

**Descripción del comportamiento del contaminante PM_{2.5}
durante las jornadas del día sin carro entre los años 2013 y 2019 en Bogotá**

María Paula Rodríguez Quiñones

Luisa Fernanda Vargas González

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al

Título de:

Ingeniero Ambiental

Director:

David Felipe Beltrán Gómez

Línea de Investigación:

Salud y Ambiente

Universidad El Bosque

Facultad de Ingeniería

Programa Ingeniería Ambiental

Bogotá, Colombia

2019

Nota de Salvedad de Responsabilidad Institucional

La Universidad El Bosque, no se hace responsable de los conceptos emitidos por los investigadores en su trabajo, solo velara por el rigor científico, metodológico y ético del mismo en aras de la búsqueda de la verdad y la justicia.

Dedicatoria

Dedicamos este trabajo a todos nuestros familiares y amigos.

Agradecimientos

Le doy gracias a Dios, por permitirme finalizar esta etapa de la mejor manera, especialmente, a mi abuelita, Cecilia Pérez de Rodríguez por ser mi ejemplo a seguir, por haberme brindado su apoyo, confianza, amor incondicional y por ser mi fortaleza en los momentos de debilidad, a mi tía Clara Inés Pérez porque ha contribuido en mi crecimiento académico y personal, particularmente a mi hermana María Isabel Rodríguez por ser mi compañera de vida, mi cocinera personal y uno de mis más grandes soportes, a mi padre Iván Eduardo Rodríguez Pérez, por haberme dado su confianza y la oportunidad de tener una educación Universitaria de Calidad, a mi madre, Adriana Cecilia Quiñones, por su amor y constante acompañamiento moral, a Jairo Alberto Quiñones, por enseñarme a ser fuerte, por haber estado a mi lado en las buenas y en las malas y por contribuir con sus conocimientos en mi proceso de formación, a Luisa Fernanda Vargas González por haber sido una excelente compañera de tesis, por su gran compromiso con este trabajo, por haberme dado el apoyo y la paciencia necesaria en los momentos más difíciles, pero sobre todo, por ser una verdadera amiga y haber hecho de su familia, una familia para mí, a la profesora María Eugenia Useda Guerrero, por haber dedicado tanto tiempo a la revisión de este documento en cada fase de construcción y al director David Beltrán por haber aportado en esta tesis con sus conocimientos.

María Paula Rodríguez Quiñones

Le agradezco a Dios por haberme permitido alcanzar esta meta, a mis padres Luis Nelson Vargas y Blanca Cielo González, por educarme en un hogar lleno de amor, y por haberme dado las herramientas necesarias y la motivación para continuar creciendo tanto profesionalmente como persona, a mis hermanos por ser una guía para mi vida, en especial a Daniel por contribuir con sus conocimientos en este trabajo de grado, a José Felipe Ballestas por todo su apoyo para culminar esta etapa, a mis amigos por cada enseñanza dada y las vivencias compartidas, a María Paula Rodríguez por ser la persona clave que me acompañó en todo este proceso de forma motivacional y académica, a la profesora María Eugenia Guerrero por sus constantes revisiones y retroalimentaciones del documento, y al profesor David Beltrán por su acompañamiento como director.

Luisa Fernanda Vargas González

Tabla de contenido

Resumen	1
Abstract	1
1. Introducción	2
2. Planteamiento del problema	3
3. Justificación	4
4. Objetivos	5
4.1. <i>Objetivo General</i>	5
4.2. <i>Objetivos específicos</i>	5
5. Marcos de Referencia	5
5.1. <i>Antecedentes</i>	5
5.1.1. <i>Jornada del día sin carro en otros países</i>	5
5.1.2. <i>Día sin carro en Bogotá</i>	6
5.1.3. <i>Medición de la concentración de los contaminantes en las jornadas del día sin carro</i>	6
5.2. <i>Estado del Arte</i>	8
5.3. <i>Marco teórico</i>	11
5.3.1. <i>Meteorología y contaminación atmosférica</i>	11
5.3.2. <i>Modelación de contaminantes atmosféricos</i>	14
5.4. <i>Marco Conceptual</i>	14
5.5. <i>Marco normativo</i>	17
5.6. <i>Marco Geográfico</i>	19
5.7. <i>Marco institucional</i>	22
6. Metodología	23
6.1. <i>Diseño Metodológico</i>	23
6.1.1. <i>Enfoque</i>	23
6.1.2. <i>Alcance</i>	24
6.1.3. <i>Método</i>	25
6.1.4. <i>Unidad de análisis</i>	27
6.1.5. <i>Muestra y población</i>	27
6.1.6. <i>Informante, número y calidad</i>	29

6.1.7.	<i>Matriz de variables</i>	29
6.2.	<i>Plan de trabajo</i>	31
6.2.1.	<i>Fases del proyecto</i>	31
6.2.2.	<i>Resumen de la metodología por objetivos</i>	40
7.	<i>Aspectos Éticos</i>	42
8.	<i>Resultados y análisis</i>	43
8.1.	<i>Resultados y análisis del primer objetivo</i>	43
8.1.1.	<i>Gráficas de puntos y líneas para las jornadas de día sin carro</i>	43
8.1.2.	<i>Gráficas Polares de dispersión del PM_{2.5} durante las jornadas del día sin carro</i>	45
8.1.3.	<i>Cálculos de altura de capa de mezcla y categorización de la estabilidad atmosférica</i>	60
8.2.	<i>Resultados y análisis del segundo objetivo</i>	61
8.2.1.	<i>Gráficas Altura de capa de mezcla y Estabilidad Atmosférica</i>	61
8.2.2.	<i>Análisis de dispersión del contaminante PM_{2.5} en las estaciones de calidad del aire Carvajal, Kennedy, Puente Aranda y Tunal</i>	67
8.2.3.	<i>Análisis de exposición de bici-usuarios y peatones en la localidad de Kennedy</i>	78
8.3.	<i>Resultados y análisis del tercer objetivo</i>	83
9.	<i>Conclusiones</i>	88
10.	<i>Recomendaciones</i>	89
11.	<i>Referencias Bibliográficas</i>	90
	Glosario de términos	103

Lista de Tablas

Tabla 1. Estaciones de monitoreo de calidad del aire de Bogotá.....	8
Tabla 2. Categorías de estabilidad atmosférica según Turner y Pasquill	12
Tabla 3. Normatividad Colombiana aplicable al proyecto	17
Tabla 4. Políticas, planes y/o acciones encaminadas a disminuir la contaminación del aire en Bogotá y Colombia.....	18
Tabla 5. Instituciones con información referente al proyecto	22
Tabla 6. Jornadas del día sin carro en la ciudad de Bogotá para el periodo 2013 a 2019	27
Tabla 7. Estaciones de monitoreo de la calidad del aire escogidas para cada jornada del día sin carro	28
Tabla 8. Mediciones de radiación solar en las estaciones de monitoreo de la calidad del aire	28
Tabla 9. Variables de la dimensión ecológica	30
Tabla 10. Variables de la dimensión social	30
Tabla 11. categoría de estabilidad atmosférica Pasquill-Gifford para horas diurnas.....	37
Tabla 12. Categoría de estabilidad atmosférica Pasquill-Gifford para horas nocturnas	37
Tabla 13. Aforos Bici-usuarios años 2017 y 2018	38
Tabla 14. Fechas recomendadas para cambiar la jornada del día sin carro	39
Tabla 15. Resumen de la metodología del primer objetivo	40
Tabla 16. Resumen de la metodología del segundo objetivo	41
Tabla 17. Resumen de la metodología del tercer objetivo.....	42
Tabla 18. Gráficas del comportamiento del PM _{2.5} durante las jornadas del día sin carro desde el 2013 hasta el 2019 para cada una de las estaciones estudiadas.	43
Tabla 19. Ejemplo de Rosa de Vientos y Rosa de contaminantes	46
Tabla 20. Gráficas Polares para la estación Carvajal en el periodo de año 2014 al 2019	47
Tabla 21. Gráficas Polares para la estación Centro de alto rendimiento en el periodo de 2013 al 2019	48
Tabla 22. Gráficas Polares para la estación Ferias en el periodo de 2014 al 2019	49
Tabla 23. Gráficas Polares para la estación Guaymaral en el periodo de 2015-1 al 2019.....	50
Tabla 24. Gráficas Polares para la estación Kennedy en el periodo de 2013 al 2019	51
Tabla 25. Gráficas Polares para la estación Ministerio de Medio Ambiente en el periodo de 2015-1 al 2019	52
Tabla 26. Gráfica polar para la estación de Fontibón en el año 2019.....	53
Tabla 27. Gráfica polar para la estación Puente Aranda en el periodo de 2017 al 2019	54
Tabla 28. Gráfica polar para la estación San Cristóbal en el periodo de 2015-1 al 2019.....	54
Tabla 29. Gráfica polar para la estación Suba en el periodo de 2015-1 al 2019	55
Tabla 30. Gráfica polar para la estación Tunal en el periodo de 2014 al 2019	56
Tabla 31. Gráfica polar para la estación Usaquén en el periodo de 2014 al 2019.....	58
Tabla 32. Altura de capa de mezcla y estabilidad atmosférica de las estaciones de monitoreo de calidad del aire durante las jornadas del día sin carro del año 2013 al 2019.....	62
Tabla 26. Gráfica polar para la estación de Fontibón en el año 2019... ¡Error! Marcador no definido.	

Lista de Figuras

Figura 1. Comparación entre una situación de flujo normal con una de inversión térmica	13
Figura 2. Procesos que influyen en el estado de la calidad del aire.....	16
Figura 3. Mapa de la localización de las estaciones de monitoreo de calidad del aire en Bogotá	19
Figura 4. Descripción enfoque mixto del proyecto	24
Figura 5. Descripción del alcance del proyecto.....	25
Figura 6. Descripción del método del proyecto.....	26
Figura 7. Plan de trabajo del proyecto.....	32
Figura 8. Algoritmo utilizado para analizar los datos de la jornada del día sin carro	33
Figura 9. Determinación altura de capa de mezcla.....	36
Figura 10. Mapa de las estaciones de monitoreo de calidad del aire Carvajal, Kennedy, Puente Aranda y Tunal.....	69
Figura 11. Mapa de las zonas cercanas a la estación de monitoreo de calidad del aire Carvajal	70
Figura 12. Sobreposición de las gráficas polares de la estación de calidad del aire Carvajal para los años 2018 y 2019	70
Figura 13. Mapa de las zonas cercanas a la estación de monitoreo de calidad del aire Kennedy	72
Figura 14. Sobreposición de las gráficas polares de la estación de calidad del aire Kennedy para los años 2018 y 2019	72
Figura 15. Mapa de las zonas cercanas a la estación de monitoreo de calidad del aire Puente Aranda	74
Figura 16. Sobreposición de las gráficas polares de la estación de calidad del aire Puente Aranda para los años 2018 y 2019.....	75
Figura 17. Mapa de las zonas cercanas a la estación de monitoreo de calidad del aire Tunal	76
Figura 18. Sobreposición de las gráficas polares de la estación de calidad del aire Tunal para los años 2018 y 2019	76
Figura 19. Mapa de las ubicaciones de los aforos de bici-usuarios y peatones en la localidad de Kennedy y cercanías	79
Figura 20. Conteo de bici-usuarios y peatones en la localidad de Kennedy para los años 2017 y 2018.....	80
Figura 21. Conteo peatones en la localidad de Kennedy para los años 2017 y 2018.....	80
Figura 22. Concentración de $PM_{2.5}$ y altura de capa de mezcla para los lunes del mes de agosto de los años 2018 y 2019 en la estación de calidad del aire Carvajal.....	85
Figura 23. Concentración de $PM_{2.5}$ y altura de capa de mezcla para los lunes del mes de agosto de los años 2018 y 2019 en la estación de calidad del aire Kennedy	86

Lista de Anexos

Anexo 1. Gráficas Rosa de Vientos para la estación Carvajal en el periodo de año 2014 al 2019 **¡Error! Marcador no definido.**

Anexo 2. Gráficas Rosa de Viento para la estación Centro de alto rendimiento en el periodo de 2013 al 2019 **¡Error! Marcador no definido.**

Anexo 3. Gráficas Rosa de vientos para la estación Ferias en el periodo de 2014 al 2019 **¡Error! Marcador no definido.**

Anexo 4. Gráficas Rosas de viento para la estación Guaymaral en el periodo de 2015-1 al 2019 **¡Error! Marcador no definido.**

Anexo 5. Gráficas Rosa de vientos para la estación Ministerio de Medio Ambiente en el periodo de 2015-1 al 2019 **¡Error! Marcador no definido.**

Anexo 6. Gráfica Rosa de vientos de la estación Puente Aranda en el periodo de 2017 al 2019 **¡Error! Marcador no definido.**

Anexo 7. Gráfica Rosa de viento de la estación San Cristóbal en el periodo de 2015-1 al 2019 **¡Error! Marcador no definido.**

Anexo 8. Gráfica Rosa de vientos para la estación Suba en el periodo de 2015-1 al 2019 **¡Error! Marcador no definido.**

Anexo 9. Gráficas Rosa de vientos para la estación Tunal en el periodo de 2014 al 2019 **¡Error! Marcador no definido.**

Anexo 10. Gráfica Rosa de vientos para la estación Usaqué en el periodo de 2014 al 2019 **¡Error! Marcador no definido.**

Anexo 11. Gráficas Rosa de contaminantes para la estación Carvajal en el periodo de año 2014 al 2019 **¡Error! Marcador no definido.**

Anexo 12. Gráficas Rosa de contaminantes para la estación Centro de alto rendimiento en el periodo de 2013 al 2019 **¡Error! Marcador no definido.**

Anexo 13. Gráficas Rosa de contaminantes para la estación Ferias en el periodo de 2014 al 2019 **¡Error! Marcador no definido.**

Anexo 14. Gráficas Rosas de contaminantes para la estación Guaymaral en el periodo de 2015-1 al 2019 **¡Error! Marcador no definido.**

Anexo 15. Gráficas Rosa de contaminantes para la estación Kennedy en el periodo de 2013 al 2019 **¡Error! Marcador no definido.**

Anexo 16. Gráficas Rosa de contaminantes para la estación Ministerio de Medio Ambiente en el periodo de 2015-1 al 2019 **¡Error! Marcador no definido.**

Anexo 17. Gráficas Rosa de contaminantes para la estación Fontibón en el año 2019 **¡Error! Marcador no definido.**

Anexo 18. Gráfica Rosa de contaminantes de la estación Puente Aranda en el periodo de 2017 al 2019 **¡Error! Marcador no definido.**

Anexo 19. Gráfica Rosa de contaminantes de la estación San Cristóbal en el periodo de 2015-1 al 2019 **¡Error! Marcador no definido.**

Anexo 20. Gráfica Rosa de contaminantes para la estación Suba en el periodo de 2015-1 al 2019 **¡Error! Marcador no definido.**

Anexo 21. Gráficas Rosa de contaminantes para la estación Tunal en el periodo de 2014 al 2019 **¡Error! Marcador no definido.**

Anexo 22. Gráfica Rosa de contaminantes para la estación Usaquéen en el periodo de 2014 al 2019 **¡Error! Marcador no definido.**

Anexo 23. Cronograma del proyecto por semestres..... **¡Error! Marcador no definido.**

Resumen

El material particulado es uno de los contaminantes criterio más estudiado en los últimos años a causa de los efectos que tiene sobre la salud humana, por su composición más tóxica y por su fácil acceso a las vías respiratorias y al torrente sanguíneo. En numerosas ciudades se ha tratado de controlar con diferentes medidas como lo es el día sin carro en Bogotá y partiendo de esto, con el presente trabajo se busca describir el comportamiento del contaminante $PM_{2.5}$ durante las jornadas del día sin carro entre el año 2013 al 2019 en la ciudad de Bogotá, con el fin de establecer recomendaciones para reducir la exposición de grupos de interés ante las concentraciones de este contaminante. Para esto, se partirá de un enfoque mixto, un alcance descriptivo y correlacional y un método deductivo e inductivo, con los cuales se lograron obtener las tendencias de dispersión del $PM_{2.5}$ en las estaciones de monitoreo de calidad del aire y con esto, evaluar 4 puntos críticos que correspondieron a las estaciones de Carvajal, Kennedy, Tunal y Puente Aranda. Después de esto y por medio de un análisis correlacional, se determinó que la localidad de Kennedy fue la que presentó mayor riesgo durante esta jornada para después, evaluar la exposición de bici-usuarios y peatones en la zona, encontrando que, cambiar la fecha en la que se realiza la jornada del día sin carro hace más efectiva esta medida de contingencia disminuyendo la exposición de la población que participa en estas actividades, concluyendo que tener en cuenta factores climáticos y meteorológicos determina la adecuada toma de decisiones que apuntan a mejorar la calidad del aire.

Palabras clave: Calidad del aire, Emisión, Fuentes móviles, Meteorología, $PM_{2.5}$

Abstract

Particulate matter is one of the criteria pollutants and it has been studied a lot, because, it affects on human health, due to, his composition is toxic and it could get in to respiratory and blood system easily. Many cities have been tried to control the pollutant with different contingency measures such as the car free day. For that reason, the propose of this project is describe the behavior of the $PM_{2.5}$ pollutant during the car free days for 2013 year until 2019 year in the city of Bogota D.C, in order to establish recommendations to reduce the exposure of interest groups to the concentrations of this pollutant. Therefore, the project was designed with a mixed approach, a descriptive and correlational scope and a deductive and inductive method to find out dispersion trends of $PM_{2.5}$ in the air quality monitoring stations. Using the results of $PM_{2.5}$ trends, this project established interactions among different factors that increase the dispersion of $PM_{2.5}$ in Carvajal, Kennedy, Puente Aranda and Tunal. Determining that Kennedy's area was the one that presented the greatest risk during the car free day, then the exposure of bike-users and pedestrians were analyzed in the same area. Finally, the project determined that changing the date on which Bogota's government usually carry out the free car day for a monday of the month of august, instead of February, reduce the exposure of the people who participates in these activities, concluding that keep in mind climatic and meteorological factors determine the appropriate decisions to improve air quality.

Keywords: Air quality, Emission, Mobile sources, Meteorology, $PM_{2.5}$

1. Introducción

La contaminación del aire es un problema ambiental que se ha acentuado en los últimos años a nivel mundial y se ha convertido en una prioridad para varios países incluido Colombia. Una de las ciudades que presenta mayores índices de contaminación atmosférica en este país es Bogotá D.C, y debido a esto, como una medida de contingencia ante la creciente problemática, se instauró la jornada del día sin carro con el fin de disminuir la emisión de contaminantes criterio como el PM_{2.5} generados por diferentes fuentes móviles que se encuentran en la ciudad. Sin embargo, con esta medida no se han obtenido resultados eficientes, por ejemplo, en el mes de febrero del año 2019, la contaminación del aire llegó a alcanzar valores de 75 µg/m³ de PM_{2.5}, situación que llevó a ciudad a establecer una alerta naranja temporal solo 8 días después de realizarse la jornada del día sin carro (Parra, 2019) teniendo en cuenta que según el parágrafo 1 de la Resolución número 2254 de 2017 “ A partir del 1 de Julio de 2018, los niveles máximos permisibles de PM₁₀ y PM_{2.5} para un tiempo de exposición de 24 horas serán de 75 µg/m³ y 37 µg/m³ respectivamente”(p.2).

Por lo anterior, es importante tener en cuenta algunas características de este contaminante en particular. El material particulado es principalmente generado por la combustión ineficiente de combustibles fósiles y se divide en dos clases: La primera recibe el nombre de PM₁₀ y se caracteriza por contener partículas con un tamaño de 10 µm y el segundo es el PM_{2.5} que contiene partículas menores a 2.5 micras, las cuales, tienen componentes ácidos y representan un mayor riesgo para la salud porque pueden llegar a la profundidad de los pulmones, y algunas pueden alcanzar el torrente sanguíneo (Xianling, Yixin, y Xi, 2018). Debido a esto, es importante tener en cuenta los niveles máximos permisibles de contaminación determinados por la Organización Mundial de la Salud (OMS) como un riesgo para la salud humana los cuales son: 20 µg/m³ de media anual y 50 µg/m³ de media en 24h para el PM₁₀ y de 10 µg/m³ de media anual y 25 µg/m³ de media en 24h para el PM_{2.5} (OMS,2006).

En consecuencia, el presente trabajo busca describir el comportamiento del contaminante PM_{2.5} en la ciudad de Bogotá durante las jornadas del día sin carro comprendidas entre los años 2013 al 2019, teniendo en cuenta cómo la meteorología y las condiciones de emisión de la zona pueden afectar la dispersión de este contaminante y por lo tanto incidir en el nivel de exposición de la población expuesta como lo son peatones y bici-usuarios (Xiaojun Xianpeng y Peng, 2015) con el fin de sentar una base investigativa que contribuya a la elección de un día adecuado para llevar a cabo la jornada del día sin carro, además de recomendar alternativas adicionales a la medida de contingencia implementada hasta el momento. La recopilación de la información del contaminante PM_{2.5}, se realizó a través de datos generados por las estaciones de monitoreo de calidad del aire de Carvajal, Centro de alto rendimiento, Kennedy, Las Ferias, Tunal, Usaquén, Guaymaral, Ministerio de Medio ambiente, Puente Aranda, San Cristóbal, Fontibón y Suba, que son las únicas que tienen registro el contaminante PM_{2.5} en la ciudad. Cabe resaltar que la utilidad de este proyecto reside en la correlación que se realizará entre los diferentes factores meteorológicos, de emisión y la dispersión del contaminante PM_{2.5} debido a que no se tienen en cuenta al momento de establecer medidas de contingencia y al describir la incidencia de estos factores en la concentración de contaminantes como el PM_{2.5}, se puede establecer un referente para la adopción más organizada de futuras medidas de contingencia y así reducir el riesgo de exposición. Para esto, se utilizarán modelos descriptivos ejecutados en el paquete Openair, el cual es un software especializado para el análisis estadístico de datos de calidad del aire, perteneciente al

aplicativo RStudio, que permitió demostrar los cambios que ha tenido el contaminante estudiado en el periodo de tiempo seleccionado durante la jornada del día sin carro.

2. Planteamiento del problema

Las principales causas de que las medidas de contingencia como la jornada del día sin carro no presenten los resultados esperados (Parra, 2019) son la poca rigurosidad y conocimiento técnico que existe por parte de las autoridades gubernamentales al momento de evaluar y reglamentar la calidad del aire en Colombia (Díaz y Hurtado, 2015) y en Bogotá como lo han demostrado los recientes resultados de la jornada del día sin carro que se llevó a cabo el 7 de Febrero de 2019 (Universidad Libre, 2019), por ello, es posible que no se estén teniendo en cuenta estudios que asocien la meteorología y las condiciones de dispersión de los contaminantes, a esto se suma la reducida información con la que cuenta la población acerca de las fuentes generadoras de emisión (Díaz y Hurtado, 2015) y los riesgos a los que están expuestos (Soto, 2018). Estas acciones son la causa de que se sigan tomando decisiones inadecuadas en la implementación de medidas de contingencia y de que exista un aumento en el riesgo de adquisición de enfermedades cardiorrespiratorias, especialmente en poblaciones vulnerables (Franco, 2012).

Por lo anterior, el fin de este trabajo es describir los factores que afectan la dispersión del contaminante $PM_{2.5}$ en la jornada del día sin carro, el efecto que esto podría tener sobre la salud de la población expuesta como lo son peatones y bici-usuarios que se encuentren transitando en Bogotá durante esta jornada y recomendar posibles alternativas para reducir la concentración de este contaminante. Cabe señalar, que el problema de investigación es técnicamente viable porque además de que los datos necesarios para el análisis están disponibles en la plataforma de la red de monitoreo de calidad del aire, hay acceso a los programas de modelación requeridos para el desarrollo del proyecto como lo son RStudio, la librería Openair y se cuenta con la información necesaria para analizar los resultados obtenidos a partir de los modelos descriptivos estimados con información de la red de monitoreo de calidad del aire y las condiciones de emisión.

De acuerdo con lo descrito anteriormente, la pregunta problema que se busca responder con el presente proyecto es: ¿Cuál es la tendencia que ha presentado el comportamiento del contaminante $PM_{2.5}$ durante las jornadas del día sin carro entre los años 2013 y 2019 en la ciudad de Bogotá?

3. Justificación

La ONU estima que una de cada ocho muertes ocurridas a nivel mundial, es ocasionada por la contaminación del aire (Franco, 2012). En Colombia, no solo es un problema de salud ya que los costos ambientales asociados a la contaminación atmosférica durante los últimos años se incrementaron superando el 1,1% del PIB y particularmente en Bogotá, según Ortiz y Rojas (2013) los costos de enfermedades cardiorrespiratorias han superado los 180 mil millones de pesos en tratamiento de enfermedades y 21 billones de pesos en mortalidad asociados a la contaminación atmosférica en 10 años, situaciones que evidencian la necesidad de seguir implementando estrategias para controlar, evaluar y monitorear los contaminantes criterio, principalmente el $PM_{2.5}$ que es el que más afecta a la salud (IDEAM, s.f).

La importancia de monitorear el contaminante $PM_{2.5}$ es que afecta directamente la salud de la población y que no se pueden observar a simple vista. Científicamente, evaluar estos contaminantes es de gran importancia para realizar su clasificación, determinar los efectos, delimitar áreas con concentraciones elevadas y establecer modelos de medición más eficientes entre otros (Fussell y Kelly, 2015).

Debido a lo mencionado en los apartados anteriores, es de vital importancia establecer las zonas que presentan mayor riesgo por la poca dispersión del $PM_{2.5}$ en Bogotá y su vez las implicaciones que esto podría tener sobre la población expuesta. Se escogió esta ciudad en primer lugar por ser una de las que más registros de elevadas cargas contaminantes ha presentado en el país (Vargas y Rojas, 2010), también, por la accesibilidad que se tiene a los datos, por la variabilidad del clima en la ciudad debido a su régimen bimodal con el cual se pueden relacionar valores de temperatura y dispersión de $PM_{2.5}$ en periodos de tiempo específicos, en segundo lugar, por el crecimiento industrial significativo que ha venido presentando Bogotá en los últimos años (Dueñas, Morales y Olmos, 2009) y en tercer lugar porque aún está permitida la circulación de vehículos con motores obsoletos dentro del parque automotriz. Así, con estos factores se podrá contemplar con mayor claridad el movimiento del $PM_{2.5}$ hacia otros espacios por la dirección del viento, teniendo en cuenta los niveles de exposición de la población que más transita en Bogotá durante la jornada del día sin carro como lo son peatones y bici-usuarios, los cuales se obtendrán a partir de una recopilación de datos de los años 2017 y 2018 de los aforos vehiculares del SIMUR (Secretaría Distrital de Movilidad, s.f.) y con esto poder recomendar alternativas para desarrollar la jornada de forma adecuada. Asimismo, los proponentes de esta investigación desarrollarán una capacidad de análisis que pueda adaptarse a diferentes datos, relacionándolos de manera interdisciplinaria en el contexto urbano a través del uso de aplicativos como RStudio y el modelamiento de gráficas y mapas (Universidad el Bosque, s.f.).

4. Objetivos

4.1. Objetivo General

Describir el comportamiento del contaminante PM_{2.5} medido en las jornadas del día sin carro entre los años 2013 y 2019 en la ciudad de Bogotá, así como las posibles alternativas que se podrían implementar para reducir el impacto sobre la exposición de grupos de interés a las concentraciones de este contaminante.

4.2. Objetivos específicos

- 1) Determinar el comportamiento del contaminante PM_{2.5} durante las jornadas del día sin carro entre los años 2013 y 2019 a través de modelos descriptivos estimados con información de la red de monitoreo de calidad del aire de Bogotá.
- 2) Analizar la relación del PM_{2.5} en las jornadas del día sin carro con las condiciones meteorológicas, de emisión y las características de posibles receptores en vía pública como lo son bici-usuarios y peatones frente al posible cambio de los niveles de exposición.
- 3) Recomendar alternativas que fomenten la reducción de posibles riesgos por exposición a PM_{2.5} en las jornadas del día sin carro teniendo en cuenta hallazgos y resultados de la investigación.

5. Marcos de Referencia

5.1. Antecedentes

5.1.1. Jornada del día sin carro en otros países

La jornada del día sin carro, no ha sido una medida solo acogida en Colombia sino también en otros países. Uno de los lugares donde se ha implementado esta medida es en Bruselas y se realiza el tercer domingo del mes de septiembre de cada año desde el 2002, lo que le ha permitido al gobierno de Bruselas conocer información valiosa acerca de los contaminantes gaseosos y partículas suspendidas relacionadas con el tráfico. Además, en un estudio desarrollado en esta ciudad para las jornadas del día sin carro entre el 2002 y el 2008, se comparó un domingo promedio, con un día entre semana común y un domingo en el que se aplicó la jornada del día sin carro, arrojando como resultado que el domingo con la medida de contingencia, se disminuyó la concentración de gases contaminantes generados por los vehículos. Sin embargo, la concentración en masa del PM₁₀ y del PM_{2.5} entre los años 2003 y 2008 fue relativamente alta e incluso se superó el límite diario de PM₁₀ durante las jornadas del día sin carro. Por ejemplo, en los resultados de este día para el año 2009 las mediciones del material particulado fueron mayores que en un domingo o día de trabajo regular, lo cual se registró en la mayoría de estaciones de monitoreo. Asimismo, se reportó que entre el 80% y el 90% de la concentración en masa total de PM₁₀ correspondía a PM_{2.5} y se concluyó que posiblemente esto ocurrió por la formación de aerosol secundario de amonio, sulfato y nitrato debido a que representaban aproximadamente el 30% del PM_{2.5} según unas muestras tomadas del aerosol (Vanderstraeten, Forton, Brasseur, Lénelle, Meurrens, y Offer, 2011).

Por otra parte, en Hong Kong, GreenPeace introdujo en el año 2009 la jornada del día sin carro como una de las iniciativas locales para reducir el consumo intensivo de energía en un 25% para el año 2030 y promover una economía baja en el consumo de carbono para enfrentar el desafío del cambio climático y, además, reforzaron los efectos del ya existente día sin carro, lanzando campañas como la Hora de la Tierra y la noche sin aire acondicionado (Yuhong, 2011).

Por último, en una investigación realizada en China, se identificaron las fuentes e interacciones de las principales especies solubles en agua del NO₃, NO₂, NH₄ y C₂O₄ para una mejor comprensión de su papel en el aire urbano. Específicamente, se escogió la jornada del día sin carro del 22 de septiembre del año 2007 llevado a cabo en Shanghai como caso estudio para conocer de qué manera, el tráfico contribuía a la generación de aerosoles, donde se encontró que los fines de semana no hay una disminución significativa en comparación con los días laborales debido a que la población tiende a conducir sus autos privados en carretera por turismo y entretenimiento los fines de semana, mientras que en su mayoría utiliza el transporte público en los días de semana para desplazamientos. Por lo tanto, en la jornada del día sin carro se mostraron descensos evidentes de las concentraciones de iones solubles NO₃ en un 64%, NO₂ en un 84% y NH₄ en un 34%, lo que demuestra que las medidas de restricción de los vehículos podrían ayudar a mitigar las concentraciones de las especies de aerosoles relacionadas con las emisiones de los vehículos (Jiang, y otros, 2018).

5.1.2. *Día sin carro en Bogotá*

A partir de la iniciativa tomada por otros países acerca del día sin carro, el 29 de Octubre del año 2000, se realizó una Consulta Popular en el Distrito Capital sobre los temas del día sin carro para implementar la medida de contingencia desde el año 2001, la restricción vehicular a partir de este año, obtuvo el voto afirmativo de más de la mitad más uno de los sufragios válidos, por lo tanto se estableció el Decreto 1098 de 2000, por el cual se adoptan las medidas tendientes a hacer efectiva la Consulta Popular (Decreto 1098 ,2000). Sin embargo, el anterior Decreto fue derogado por el Decreto 054 de 2017, por medio del cual se establecieron medidas para la circulación de vehículos automotores y motocicletas en la ciudad de Bogotá, el primer jueves del mes de febrero de todos los años y se dictaron otras disposiciones, en este decreto, básicamente se restringe la circulación de vehículos entre las 5:00 a.m., y las 7:30 pm., y que considerando los resultados de la jornada del día sin carro en el año 2015 se recomendó incluir a las motocicletas en la restricción vehicular (Decreto 054, 2017).

5.1.3. *Medición de la concentración de los contaminantes en las jornadas del día sin carro*

Para conocer la concentración de los contaminantes, la ciudad de Bogotá, cuenta con una Red de Monitoreo de Calidad del Aire, la cual, está conformada por 13 estaciones fijas de monitoreo y una estación móvil, ubicadas en diferentes sitios de la ciudad (ver Tabla 1). Estas estaciones permiten realizar un monitoreo continuo de las concentraciones de material particulado (PM₁₀, partículas suspendidas totales (PST)¹, PM_{2.5}), de gases contaminantes (SO₂, NO₂, CO, O₃) y de variables

¹ Conjunto de partículas constituidas por una fracción inhalable y aquellas mayores a 10 micras que permanecen en el aire (Resolución 610 del 2010).

meteorológicas como precipitación, temperatura, radiación solar, humedad relativa², presión atmosférica, velocidad y dirección del viento (Secretaría Distrital de Ambiente, 2019). Es así, que desde el año 2004 se han generado informes acerca de cómo se desarrolló la jornada del día sin carro y qué resultados obtuvo. En este primer año en el informe, se analizaron los contaminantes PM₁₀, PST, NO₂ y CO en un rango de una sola hora de medida en la jornada; continuando con el año 2005 se evaluaron los mismos contaminantes en la misma cantidad de tiempo y a diferencia del año 2004, se empezaron a diferenciar los vehículos que utilizaban diésel de aquellos que usaban gasolina. Desde el año 2006, se comenzó a evaluar la totalidad de la jornada y se presentaron las mismas condiciones anteriormente mencionadas; solo hasta el año 2008 se inició con la inclusión de los factores meteorológicos en los análisis de los informes y además se incluyó el control vehicular. Sin embargo, en los siguientes años 2009 y 2010 no relacionaron las características meteorológicas de la jornada del día sin carro y el análisis del control vehicular se realizó solo en el año 2009, el cual se vuelve a retomar en el año 2012 y se lleva a cabo por última vez en el año 2014; en el año 2015 se empezaron a incluir en los análisis los resultados obtenidos para el PM_{2.5}, que es el contaminante a estudiar en el presente trabajo.

En lo que concierne a los años 2016, 2017 y 2018 la información presentada en los reportes disminuye su calidad, en cuanto a que no se muestran gráficos ni mapas para hacer la información más fácil de entender en comparación a los años anteriores y en cuanto al año 2019, hasta el momento no han publicado el informe anual de la jornada del día sin carro (Secretaría Distrital de Ambiente, s.f).

Asimismo, la información de los temas de calidad del aire puede ser encontrada en el portal de la Red de Monitoreo de la Calidad del aire de Bogotá (RMCAB). En esta sección, hay un mapa donde se puede ver la información sobre la concentración de contaminantes del aire de las 13 estaciones fijas de monitoreo, además, se encuentra la información de Air Quality Index (AQI), el cual, indica el grado de pureza o contaminación atmosférica y los efectos para la salud conexos.

² Es el resultado entre la razón de la presión de vapor de agua a una temperatura y presión determinadas y la presión de vapor donde su saturación se encuentre en las mismas condiciones de temperatura y presión (Dávila, Jesús, Martines y Enrique, 2016).

Tabla 1. Estaciones de monitoreo de calidad del aire de Bogotá

Estación	Latitud	Longitud	Localidad	Altura medición de vientos (m)	Tipo de estación
Guaymaral	4°47'1.52"N	74°2'39.06"W	Suba	10	De fondo
Usaquén	4°42'37.26"N	74°1'49.50"W	Usaquén	19	De fondo
Suba	4°45'40.49"N	74°5'36.46"W	Suba	10	De fondo
Bolivia	4°44'9.12"N	74°7'33.18"W	Engativá	10	De fondo
Las Ferias	4°41'26.52"N	74°4'56.94"W	Engativá	10	De tráfico
Centro de Alto Rendimiento	4°39'30.48"N	74°5'2.28"W	Barrios Unidos	10	De fondo
Ministerio de Medio Ambiente	4°37'31.75"N	74°4'1.13"W	Santa Fe	19	De tráfico
Fontibón	4°40'12.36"N	74°8'29.58"W	Fontibón	22	Industrial
Puente Aranda	4°37'54.36"N	74°7'2.94"W	Puente Aranda	20	Industrial
Kennedy	4°37'30.18"N	74°9'40.80"W	Kennedy	10	De fondo
Carvajal	4°35'44.22"N	74°8'54.90"W	Kennedy	13	Tráfico e Industrial
Tunal	4°34'34.41"N	74°7'51.44"W	Tunjuelito	10	De fondo
San Cristóbal	4°34'21.19"N	74°5'1.73"W	San Cristóbal	10	De fondo

Fuente: (Secretaría Distrital de Ambiente, 2013)

5.2. Estado del Arte

Bogotá es hoy una de las ciudades más contaminadas de América Latina debido a que no existe un control riguroso de la calidad del aire y a que las medidas de contingencia, implementadas actualmente, son insuficientes (Franco, 2012). Una de estas medidas es la jornada del día sin carro, la cual consiste en definir un horario determinado durante el día y algunas horas de la noche de uno o dos días al año, dependiendo de las condiciones ambientales, para restringir la salida de automóviles particulares y permitir la circulación del resto de la malla vial. Sin embargo, muchos de los vehículos de transporte público que quedan habilitados en este periodo, además de presentar estructuras obsoletas que generan grandes emisiones de contaminantes (Rodríguez, 2017), aún utilizan motores que funcionan con combustible diésel. Estos son energéticamente eficientes, pero sus emisiones de partículas son responsables de graves problemas ambientales y de salud, lo cual ocurre debido a que dentro de un motor la combustión incompleta de un hidrocarburo genera, según Venkateswara y Prasad (2010) “la

formación de material particulado que está compuesto en su mayoría de carbón con pequeñas trazas de compuestos orgánicos sin quemar, de combustible, aceite lubricante y compuestos inorgánicos como ceniza y azufre” (p.2). Asimismo, existen numerosas fuentes generadoras de material particulado como la producción industrial masiva que se ha venido incrementando en los últimos años en la ciudad (Villegas y Parra, 2017) y otras causas que se desarrollarán a lo largo del presente proyecto, partiendo de los resultados del comportamiento de $PM_{2.5}$ en la jornada del día sin carro desde el año 2013 al 2019 a través de modelos descriptivos estimados con información de la red de monitoreo de calidad del aire de Bogotá.

Hacer uso de herramientas informáticas para observar las variables que influyen en el comportamiento de la contaminación atmosférica y la calidad del aire, es de gran importancia para entender y analizar las relaciones entre sus componentes y posteriormente lograr identificar las posibles causas y consecuencias del estado del aire en determinado periodo de tiempo (Zannetti, 1990). Numerosos estudios se han realizado a partir de estas herramientas y algunos métodos de cálculo matemático, por ejemplo, en la ciudad de Münster, Alemania, se evaluó el nivel de exposición individual al contaminante $PM_{2.5}$ a través del modelo de transporte de partículas LASAT y una simulación Lagrange de transporte de aerosol para el área urbana. En este modelo se tuvo en cuenta el promedio anual del transporte, dirección del viento, sedimentación, deposición seca y húmeda y conversión química del material particulado y finalmente se graficó el comportamiento de este contaminante, en intervalos de 10 minutos en interiores y 30 minutos en el exterior, obteniendo que la exposición personal hacia $PM_{2.5}$ está fuertemente influenciada por fumar, cocinar y la concentración de $PM_{2.5}$ en el exterior (Gerharz, Krüger, y Klemm, 2009).

Igualmente, en una investigación realizada en Santiago de Chile se utilizó la regresión Poisson, en un periodo de cinco años para establecer una asociación a corto plazo entre la contaminación del aire, la variación de datos epidemiológicos y variables meteorológicas para ser expuesta mediante diagramas de dispersión del contaminante, las cuales relacionaron los datos de ingresos hospitalarios, de la concentración del contaminante y datos meteorológicos, para posteriormente espacializarlos en un mapa donde se encontró una causalidad directa entre la exposición del $PM_{2.5}$ y las enfermedades cerebrovasculares (Leiva, Santibañez, Ibarra, Matus, y Seguel, 2013). En otro estudio desarrollado en Nueva York, se utilizaron modelos para predecir la eficiencia de infiltración residencial de $PM_{2.5}$ para más de 6.000 hogares y su correlación con enfermedades cardiovasculares a través de SAS software (versión 9.3; SAS Institute Inc., Cary, NC, USA) con el que se pueden hacer diagramas de bigotes para establecer los valores atípicos de $PM_{2.5}$ en interiores y gráficas de dispersión para relacionar factores climáticos con el contaminante a partir de colores, en este trabajo, también se encontró una relación directa entre la concentración del contaminante y la generación de enfermedades cardiovasculares (Allen y otros, 2012).

Del mismo modo, en Madrid se hizo un estudio similar a los descritos anteriormente, pero en este caso, se buscaba, analizar el efecto a corto plazo de las concentraciones de $PM_{2.5}$, medidas diariamente, sobre la mortalidad respiratoria de grupos poblacionales vulnerables utilizando diagramas de dispersión para este propósito, los cuales se ajustaron utilizando el lenguaje de programación R, pero con el aplicativo “Locally wighted scatterplot smoothing” LOWESS y para calcular los aumentos de $10\mu g / m^3$ de $PM_{2.5}$ en cada contaminante emitido por fuentes móviles, se utilizó el programa de

software SPSS 15.0 (SPSS Inc., TM Apache Software Foundation) encontrando un total de 10,351 muertes por enfermedades respiratorias (Pichiule, Guaita, Maté, Linares y Julio, 2011).

Por otra parte, demostraciones del estado de la calidad del aire que abarcan la relación de diferentes variables, también se han llevado a cabo con la librería Openair, el cual pertenece al lenguaje R y será la herramienta utilizada en el presente proyecto. Con este programa se han desarrollado investigaciones como la que se hizo en Bejin al analizar la relación entre las concentraciones de PM_{2.5} y PM₁₀, la dirección del viento y las condiciones meteorológicas para cada estación de la ciudad a través de modelos estadísticos y de dispersión contruidos con RStudio (versión 3.1.2) y el aplicativo Openair (versión 1.4) (Yin, Hu, Wang y Wong, 2016). De la misma forma, un estudio llevado a cabo en Bogotá, caracterizó las fuentes de material particulado que más generaban concentraciones de PM₁₀ a través de Openair para resumir de forma gráfica el comportamiento de cada uno de los datos obtenidos y el promedio de los mismos por estación mediante las funciones TheilSen, ggmap y smoothTrend. Esta función “genera una gráfica de concentraciones medias mensuales de un parámetro seleccionado, dando lugar al diagrama de dispersión de pares de datos sobre el que construye una línea de tendencia suavizada” (Villegas y Parra, 2017, pp.25-26) y con el mismo programa, pero con la función WindRose, crearon rosas de contaminantes para evaluar la dispersión obteniendo el número de fuentes de emisión de PM₁₀ en la zona evaluada (Villegas y Parra, 2017).

Otro estudio elaborado al sur de Reino Unido utilizó los componentes del paquete Openair con los que a través de gráficas se lograron identificar picos nocturnos recurrentes de PM_{2.5} generados por las constantes fuentes móviles que transitaban por la zona de estudio durante el día, atribuyendo este comportamiento a la evaporación de componentes semi-volátiles, en particular el nitrato de amonio. Con los elementos resultantes de la modelación también se pudo observar que las concentraciones de PM_{2.5} son más altas en los meses de invierno y más bajas a mediados del verano (Harrison, Laxen, y Moorcroft, 2012). De modo similar ocurre con un estudio desarrollado en la provincia de Sancti Spiritus en Cuba, en el que se buscaba determinar el grado de contaminación atmosférica en la zona a partir de un análisis correlacional entre variables climatológicas y emisiones contaminantes para lo cual se utilizó el aplicativo RStudio con el paquete Openair, el cual permitió condensar la información y ofrecer numerosas combinaciones para trazar el modelo estadístico deseado del contaminante (Castillo, 2018).

Cabe resaltar que, aunque todos los recursos informáticos mencionados son de gran utilidad para identificar las problemáticas generadas por la mala calidad del aire, especialmente por el contaminante PM_{2.5}, la verdadera finalidad está en formular alternativas para reducir estas concentraciones y los efectos negativos que evidentemente tienen en la salud humana. Numerosos países han adoptado planes de contingencia que han resultado exitosos, por ejemplo, en un estudio realizado en Bejin, se evaluaron los efectos ambientales y económicos de las restricciones de conducción. Según los datos diarios de varias estaciones de monitoreo, la contaminación del aire cae un 8% en un día promedio y un 19% durante las restricciones realizadas un día por semana, se puede observar que, según este estudio, la adopción de esta medida es efectiva debido a que existe metro en esta ciudad y a que por su legislación los vehículos adicionales de transporte público deben cumplir con los límites de emisiones establecidos por la OMS (Viard y Fu, 2015).

Otra investigación hecha en México, describe la implementación de un programa para reducir la contaminación del aire. El programa prohibió todos los vehículos, excepto taxis, autobuses, ambulancias, camiones de bomberos y carros de policía, de conducir un día laborable por semana, de 5 am a 8 pm, según el último dígito de su placa. Durante este programa se realizaron mediciones específicamente para el PM₁₀ obteniendo como resultado una reducción del 30% (Gallego, Montero, y Salas, 2013).

Igualmente, en Milán, Italia, se implementó una medida llamada Ecopass en el año 2011, la cual consistió en delimitar algunas zonas del municipio en las que se exige que los vehículos diésel fabricados de acuerdo con las normas anteriores al nivel EURO 5, y los vehículos que cumplen con el nivel EURO 4 sin filtro de partículas paguen un peaje para ingresar a la zona restringida entre las 8:00 am y las 8:00pm, lo cual generó una disminución significativa del tránsito de estos vehículos y a través de mediciones de la calidad del aire en la zona, se encontró que la contribución del carbono negro al PM₁₀ se redujo en un 47% en el área de Ecopass en comparación con la zona sin restricción (Invernizzi y otros, 2011).

En China, después de evaluar niveles de material particulado de 4 a 6 veces mayores que en los países desarrollados y después de reforzar los estándares de emisión para las centrales eléctricas, se aumentaron las restricciones de las normas de emisión para los proyectos productivos industriales en general, lo que produjo un incremento de la comercialización y uso de precipitadores electrostáticos para unidades productoras de carbón y filtros de mangas, obteniendo una disminución de 7% a 69% de PM_{2.5} en las áreas de las industrias que implementaron estas tecnologías (Wang y Hao, 2012).

Por lo anteriormente descrito, se puede entender que la calidad del aire es uno de los temas ambientales que debe permanecer en estudio continuo en el país, puesto que actualmente, hace parte de los mayores problemas de salud pública en Colombia y particularmente en Bogotá. Para el año 2017, en Colombia, el DNP estimó que los efectos de la contaminación atmosférica estuvieron asociados a 10.527 muertes y 67,8 millones de síntomas y enfermedades (DNP, 2017). Cabe resaltar que, según los últimos informes del estado de la calidad del aire, el contaminante con mayor potencial de afectación en el territorio nacional es el Material Particulado menor a 2.5 micras (PM_{2.5}) (Rodríguez, Rojas, Blanco, Herrera y Fernández, 2018).

5.3. Marco teórico

5.3.1. Meteorología y contaminación atmosférica

Las condiciones climáticas, son factores determinantes para tener una buena dispersión de los contaminantes debido a que la concentración de la emisión en un punto, cambia por convergencia o divergencia de vientos (García, 2013). Algunos artículos han tratado el tema de la relación entre la meteorología y la capacidad de dispersión de los contaminantes, por ejemplo, en el estudio de Palacio, Zafra, y Rodríguez (2014) los resultados del monitoreo móvil en la localidad de Kennedy en la ciudad de Bogotá, mostraron que existió una correlación positiva media de PM₁₀ con la temperatura, la velocidad del viento y la radiación solar en el área de investigación durante los periodos de tiempo seco. Asimismo, el estudio de Blanco, Gafaro y Rojas (2015) realizado en la localidad de Kennedy señala que esta zona es una de las que más concentra contaminantes y que cuando precipita se genera

una disminución de partículas PM₁₀ gracias al lavado de las mismas, pero aumentan la concentración de PM_{2.5} por el incremento de la humedad relativa. Así, los factores anteriormente mencionados se ven envueltos en los conceptos de estabilidad atmosférica, altura de capa de mezcla e inversión térmica.

5.3.1.1. Estabilidad atmosférica

La estabilidad atmosférica es la condición de equilibrio del aire en la atmósfera que se puede comportar de manera inestable cuando es turbulento y estable cuando es laminar, según Seibert, y otros (2000) citado por Jiménez (2016) una de las formas para analizar la estabilidad atmosférica es por medio de los esquemas de clasificación de la estabilidad. Pasquill definió seis categorías de estabilidad A extremadamente inestable, B moderadamente inestable, C ligeramente inestable, D neutral, E ligeramente estable, y F moderadamente estable. Donde los factores determinantes son la velocidad del viento, la nubosidad y el flujo de radiación solar (Jiménez, 2016). Posteriormente, según Santa Cruz (2000), Turner redefinió las categorías en valores numéricos de tal forma que se pudiera categorizar la estabilidad atmosférica utilizando la misma información obtenida de los reportes meteorológicos y estableciendo la siguiente correspondencia (Ver tabla 2).

Tabla 2. Categorías de estabilidad atmosférica según Turner y Pasquill

Según Turner	Según Pasquill	Denominación
1	A	Extremadamente inestable
2	B	Moderadamente inestable
3	C	Ligeramente inestable
4	D	Neutral
5	E	Ligeramente estable
6	F	Moderadamente estable
7		Extremadamente estable

Fuente: Santa Cruz (2000)

5.3.1.2. Altura de capa de mezcla

La estabilidad atmosférica es un factor que determina la altura de capa de mezcla y se define como la capa más próxima al terreno donde se están emitiendo los contaminantes siendo dispersada de forma vertical por convección³ o turbulencia mecánica⁴ en un periodo aproximadamente de una hora (Jiménez, 2016). También, Arya (1998) citado por Vicuña (2017) señala que en términos de contaminación ambiental la altura de capa de mezcla se puede definir como el espesor del aire por medio del cual los contaminantes son transportados y dispersados en la atmósfera, por lo tanto, se plantea que existe una relación directa entre la contaminación de un lugar y el espesor del estrato del aire.

³ Transferencia de calor entre partículas en el aire que ganan temperatura (Jiménez, 2016).

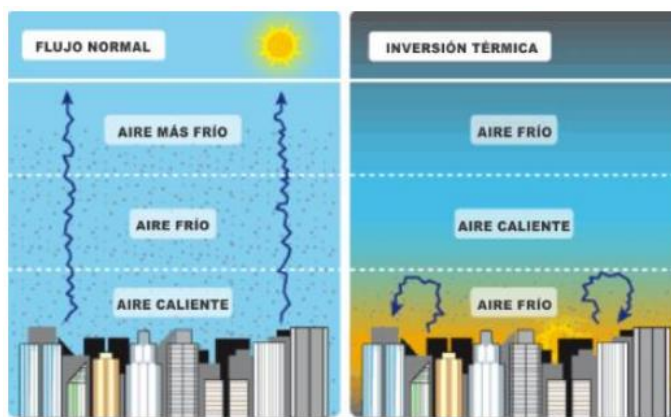
⁴ Movimientos irregulares en la atmósfera ocasionados por el viento (Ortíz, 2016)

Es así, como el volumen de aire disponible para el mezclado de los contaminantes en la atmósfera depende de las condiciones de estabilidad atmosférica, puesto que, aumenta o disminuye evidenciándose que en las noches por la poca turbulencia la atmósfera tiende a ser estable, mientras que en el día tiende a ser inestable al aumentar la turbulencia por la generación de corrientes térmicas debido al sol (Jiménez, 2016). Este factor es importante a la hora de analizar la dispersión de los contaminantes porque el comportamiento de esta variable es el indicativo de la capacidad de mezclado y por lo tanto de la dispersión de contaminantes, en este caso el PM_{2.5}.

5.3.1.3. Inversión Térmica

La inversión térmica es un factor que está determinado por las condiciones de estabilidad atmosférica y de altura de capa de mezcla, se trata de una variación natural dentro de la atmósfera que ocurre cuando la temperatura se incrementa con la altitud en un estrato atmosférico específico y por lo tanto produce una alteración en el comportamiento normal del aire que debía enfriarse con la altitud y el gradiente vertical de temperatura se interrumpe (Gallego y otros, 2012). Es posible que este incremento térmico se genere desde la superficie o a partir de determinada altura dando lugar a cuatro tipos de inversiones térmicas: “de superficie, por subsidencia, por turbulencia y frontal, las cuales están sujetas a cambios de temperatura y condiciones meteorológicas específicas” García (2012) citado por Babativa (2018, p.38). Este fenómeno genera un aumento del riesgo en una zona urbana, ya que, por un lado se acentúan los efectos perjudiciales de las islas de calor⁵ debido a que la capa de aire caliente que empieza a cubrir el área, dificulta el flujo de corrientes de aire ascendentes que dispersen los contaminantes. Esta circunstancia empeora en presencia de masas de aire de alta presión, que favorecen que la inversión térmica se prolongue por más tiempo, generando que los contaminantes del aire en la superficie se concentren lo suficiente para alcanzar valores nocivos para la salud Alfaro y otros (2008) citado por García, Ramírez, Ulloa, Arias y Pérez (2012). A continuación, se mostrará el fenómeno descrito anteriormente de manera gráfica

Figura 1. Comparación entre una situación de flujo normal con una de inversión térmica



Fuente: Vegas (2016) citado por Babativa (2018, p 38).

⁵ Son el resultado de la acumulación del calor en zonas urbanas por un incremento en la temperatura del área (Vegas,2016).

5.3.2. Modelación de contaminantes atmosféricos

En las últimas décadas, la modelación se convirtió en una herramienta habitual de diversas disciplinas que buscan explicar o reproducir sus respectivas observaciones. Por consiguiente, dentro del ámbito de las ciencias naturales, se ha utilizado la modelación para describir los procesos ambientales y del transporte de contaminantes (Wuebbles y Rodhe, 2002). Estas modelaciones permiten determinar los resultados o predecir lo que podría ocurrir en un sistema a partir de un conjunto de datos de entrada (Bustos, 2004). Uno de los usos de la modelación es determinar de manera clara, las variaciones de la concentración de los contaminantes criterio en un determinado tiempo y espacio con el fin de pronosticar y estudiar la calidad del aire para contribuir tanto en las decisiones políticas como en la planificación ambiental de un territorio a partir de planes y programas Bustos (2004), citado por Arciniegas (2012). Los modelos de calidad del aire tienen el propósito de explicar el transporte, dispersión, y reacciones químicas en la atmósfera de contaminantes, donde se combinan al mismo tiempo modelos de meteorología y emisiones (Rincón, 2015), estos son de gran importancia puesto que se utilizan para entender y pronosticar fenómenos que proveen información de entrada a los modelos de calidad del aire.

5.3.2.1. Modelación con Openair

Openair es una librería propia de R, el cual, es un lenguaje de programación diseñado para el análisis estadístico y gráfico de datos, además, es un software libre que se otorga bajo la licencia GNU GPL. El paquete Openair, se encuentra específicamente diseñado para manejar información de calidad del aire, que consiste, en una consola donde se introducen instrucciones a ejecutar una vez se han cargado previamente las variables a analizar (Follos, 2012). Según Rivera y Ramos (2015) esta librería se encuentra integrada por herramientas que tratan, analizan estadísticamente y visualizan los datos recopilados de una estación de monitoreo de calidad del aire, basándose en variables como la concentración de los contaminantes en el aire y el comportamiento de la dirección y la velocidad del viento. En general, las funciones que se utilizaron en el presente proyecto son *plot*, *windRose*, *pollutionRose* y *Polarplot*. La primera función, *plot*, hace referencia a las instrucciones utilizadas en el lenguaje R para llevar a cabo una visualización gráfica lineal de variables X y Y (Follos, 2012). Continuando con *windRose*, según Nevers (1998) citado por Rivera y Ramos (2015) es una gráfica que de forma simultanea representa los datos de la dirección del viento y velocidad del viento, obteniendo la dirección en la cual tiende con más frecuencia a soplar el viento y, por lo tanto, hacia donde se dispersan los contaminantes. En cuanto a *pollutionRose*, en esta grafica se cambia la velocidad del viento por la concentración de los contaminantes, en este caso el PM_{2.5}, logrando identificar los posibles lugares en donde se localizan las fuentes de emisión Rivera y Ramos (2015). Por último, la función *polarPlot*, representa gráficamente una variable determinada en función a las relaciones de dirección y velocidad del viento generado por un modelizado matemático, es de gran utilidad al visualizar la manera en la que cual se está dispersando el contaminante en la atmosfera (Follos, 2012).

5.4. Marco Conceptual

Atmósfera: La atmósfera de la Tierra es una “cobertura gaseosa compuesta principalmente por nitrógeno (N₂) y oxígeno (O₂) molecular, con pequeñas cantidades de otros gases, como vapor de agua (H₂O) y dióxido de carbono (CO₂)” (Camilloni y Vera, 2015, p 3). Esta, se divide en una serie de capas

dependiendo de la altura y la temperatura que presentan cada una de ellas (Camilloni y Vera, 2015), una de las capas es la troposfera, la cual, está conformada por una mezcla gaseosa de la siguiente forma: 78% de hidrógeno, 21 % de oxígeno y 1% de argón, dióxido de carbono y ozono, en esta capa se concentra el 80 % de toda la masa de la atmósfera y es donde ocurren los fenómenos meteorológicos (Sánchez y Gándara, 2011). El término de atmósfera es de importancia en el presente proyecto porque es en una de sus capas donde se va a estudiar el fenómeno de la dispersión del PM_{2.5} teniendo en cuenta los procesos climáticos.

Meteorología: Según Rodríguez, Benito, y Portela (2004) la meteorología es la ciencia que estudia la atmósfera y los fenómenos como la precipitación y los vientos que en ella suceden, en un momento dado, determinados por la presión, la temperatura, la humedad y el viento, conocido como tiempo atmosférico. Este concepto es importante tenerlo claro para el desarrollo del proyecto, debido a que los factores anteriormente mencionados determinan la dispersión del contaminante PM_{2.5}.

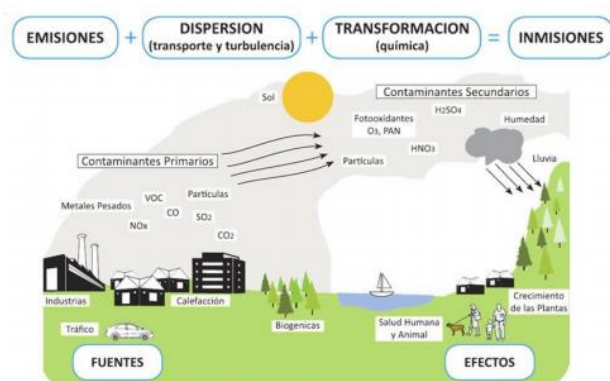
Contaminación del aire: Se produce cuando según Sánchez y Gándara (2011) hay un cambio en los componentes mencionados en la definición de atmósfera. Es así como Romero, Francisca, y Álvarez (2006) definieron la contaminación del aire como el cambio no deseado del ambiente debido a la introducción de agentes contaminantes que conllevan a generar algún daño a la salud humana, afecta los recursos naturales y/o cambia el equilibrio ecológico. La importancia de este concepto en el proyecto es que debido a la contaminación atmosférica se han empezado a generar problemas en la salud y por lo tanto se hace necesario estudiar el comportamiento de los contaminantes como el PM_{2.5}.

Material particulado: Es uno de los contaminantes que contribuyen a la contaminación atmosférica al estar compuesto por partículas respirables presentes en la atmósfera (Boldo, 2012), según Simkhovich, Kleinman y Kloner (2008) citado por (Castro y otros, 2010, p. 307) “es una mezcla heterogénea de sólidos y partículas líquidas suspendidas en el aire, que continuamente están variando en tamaño y composición química en el espacio y tiempo”. Estas partículas se dividen en dos categorías PM₁₀ y PM_{2.5}, el primero se refiere a las partículas suspendidas menores a 10 micrómetros en su mayoría de pH básico provenientes de la combustión no controlada (Quijano, Quijano, y Henao, 2010), el segundo está constituido según el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (2007) citado por Baste, 2013, por partículas que presentan un diámetro menor o igual a los 2.5 micrómetros y pueden ser varias veces más pequeñas que un cabello humano, son la fracción más agresiva debido a que al respirarlas tienen la capacidad de ingresar a los alveolos pulmonares y llegar al torrente sanguíneo (Quijano, Quijano, y Henao, 2010). Este es el concepto que tiene más relevancia en el proyecto, debido a que es el contaminante que se va a estudiar como objetivo del trabajo.

El PM_{2.5}, que es el elemento en el cual se hace mayor énfasis a lo largo del presente proyecto se genera por dos causas principales. La primera es clasificada como de carácter primario y es producto de actividades antropogénicas como lo son las emisiones provenientes de vehículos a diésel, de procesos industriales y los procesos rápidos de condensación de gases expulsados a altas temperaturas (Ministerio para la Transición Ecológica de España, s.f.) y la segunda es clasificada como emisión

secundaria, la cual se forma por reacciones fundamentalmente fotoquímicas⁶ en la atmósfera (Ministerio de Medio Ambiente, 2016) a partir de contaminantes primarios, y otras especies químicas presentes en el aire como nitratos y sulfatos producidos por la oxidación de NO_x y SO_x, aerosoles orgánicos secundarios, como el peroxiacetil nitrato (PAN) y los hidrocarburos policíclicos aromáticos (HPA) (Fontaneda, 2016) cómo se muestra a continuación en la ilustración 2:

Figura 2. Procesos que influyen en el estado de la calidad del aire



Fuente: Ministerio de Medio Ambiente (2016)

Fuente móvil: Según la resolución 909 del 2008 por la cual se reglamentan los niveles permisibles de emisión de contaminantes, establece dentro de sus definiciones que una fuente móvil es aquella susceptible de desplazarse. Para efectos de la ciudad de Bogotá son los vehículos automotores, las motocicletas, los motociclos y los mototriciclos. Según Carmona y otros, (2016) las emisiones de estas fuentes están relacionadas con la calidad del combustible, formas de conducir, las áreas donde se moviliza un vehículo, el estado y mantenimiento de los mismos, las condiciones de las vías y velocidades promedio del desplazamiento. Este concepto tiene una importancia significativa al ser la variable que más genera emisiones contaminantes y que se busca controlar al establecer las jornadas del día sin carro.

Carbono negro: El Carbono negro es un conjunto de partículas y nano-partículas resultantes de la combustión incompleta de combustibles fósiles, biocombustibles y biomasa. Estas estructuras, son uno de los componentes del PM₁₀ y el PM_{2.5} caracterizados por su gran capacidad para absorber la energía solar por unidad de masa en la atmósfera y se identifica por su visible color negro (Corporación Ambiental Empresarial, 2017). En el presente proyecto, se debe tener en cuenta este material puesto que en numerosos estudios se toma como parámetro de medición para el PM₁₀ o el PM_{2.5}.

Aerosol secundario: Son aquellas partículas sólidas y líquidas de forma conjunta que se presentan en la atmósfera en fracción gaseosa, según Jenkin y Clementshaw (2000) citado por De Blas Martín (2009) se producen por procesos de conversión gas-partícula y tienen la capacidad de absorber y dispersar la radiación solar, afectando el equilibrio radiactivo de la tierra.

⁶ Reacciones que se producen en la atmósfera con la intervención de la energía solar (Sánchez y Gandara, 2011).

5.5. Marco normativo

A continuación, se presentará la normatividad que rige la calidad del aire en territorio colombiano y que compete al presente proyecto específicamente.

Tabla 3. Normatividad Colombiana aplicable al proyecto

Norma legal	Propósito	Secciones que aplican al proyecto
Constitución de Colombia del año 1991	Máxima norma que contiene un conjunto de reglas que establece como se debe comportar la ciudadanía y se establecen los deberes, derechos y garantías con los que cuenta la población.	Artículo 79°, 80°, 313° y 339°
Ley 9 del 24 de enero de 1979	Por la cual se dictan las normas sanitarias	Artículo 1°, 41° - 49° de las emisiones atmosféricas
Ley 99 del 22 de diciembre de 1993	Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA y se dictan otras disposiciones	Título I al Título XVI
Decreto Ley 2811 del 18 de diciembre de 1974	Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente.	Parte II: Del artículo 72° al 76°
Decreto 979 del 3 de abril de 2006	Por el cual se modifican los artículos 7,10, 93, 94 y 108 del Decreto 948 de 1995.	Artículos 2°, 3°, 4° y 5°
Decreto 174 del 30 de mayo de 2006	Por medio del cual se adoptan medidas para reducir la contaminación y mejorar la calidad del Aire en el Distrito Capital	Artículo 1°
Decreto 1076 del 26 de mayo de 2015	Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible	Parte 2 Reglamentaciones, Título 5, Aire, Capítulo 1 Reglamento de Protección y Control de la Calidad Del Aire
Decreto 054 de 2017	Por medio del cual se establecen medidas para la circulación de vehículos automotores y motocicletas, en la ciudad de Bogotá el primer Jueves del mes de febrero de todos los años y se dictan otras disposiciones.	Del artículo 1° al 4°
Decreto 456 del 6 de agosto de 2018	Por medio del cual se declara Bogotá una capital mundial de la bicicleta	Artículo 1°, 2° y 3°
Resolución 910 del 5 de Junio del 2008	Por la cual se reglamentan los niveles permisibles de emisión de contaminantes que deberán cumplir las fuentes móviles terrestres, se reglamenta el artículo 91 del Decreto 948 de 1995 y se adoptan otras disposiciones	Del artículo 1° al 39°

Descripción del comportamiento del contaminante criterio PM_{2.5} durante las jornadas del día sin carro entre los años 2013 y 2019 en Bogotá

Resolución 650 del 29 de marzo de 2010	Por la cual se adopta el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire.	Del artículo 1° al 4°
Resolución 2154 del 2 de noviembre de 2010	Por la cual se ajusta el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire adoptado a través de la Resolución 650 de 2010 y se adoptan otras disposiciones.	Del artículo 1° al 2°
Resolución 2410 del 11 de diciembre de 2015	Por medio de la cual se establece el Índice Bogotano de Calidad del Aire –IBOCA– para la definición de niveles de prevención, alerta o emergencia por contaminación atmosférica en Bogotá D.C. y se toman otras determinaciones	Del artículo 1° al 13°
Resolución 2254 del 1 de Noviembre del 2017	Por la cual se adopta la norma de calidad del aire ambiente y se dictan otras disposiciones.	Del artículo 1° al 26°

Fuente: Elaboración propia con referencia en la normatividad colombiana

Además de las anteriores referencias normativas, a lo largo del proyecto también se tuvo en cuenta diferentes políticas, planes y/o acciones encaminados a disminuir la contaminación del aire en la ciudad de Bogotá y en Colombia como se puede ver en la tabla 4.

Tabla 4. Políticas, planes y/o acciones encaminadas a disminuir la contaminación del aire en Bogotá y Colombia

Políticas, planes y/o acciones	Propósito
Política de Prevención y Control de la Contaminación del Aire en Colombia año 2010	Impulsar la gestión de la calidad del aire en el corto, mediano y largo plazo, con el fin de alcanzar los niveles de calidad del aire adecuados para proteger la salud y el bienestar humano, en el marco del desarrollo sostenible.
Plan Decenal de Descontaminación del Aire para Bogotá año 2010-2020	Busca tomar medidas para disminuir la contaminación ambiental en un término de 10 años
Plan de movilidad sostenible de Bogotá año 2018-2020	Establecer en tres líneas de movilidad institucional, las estrategias que conlleven a una movilidad urbana sostenible en todas las unidades operativas y administrativas de la Secretaría Distrital de Integración Social, mediante acciones tendientes al aumento progresivo de otros medios de transporte sostenible

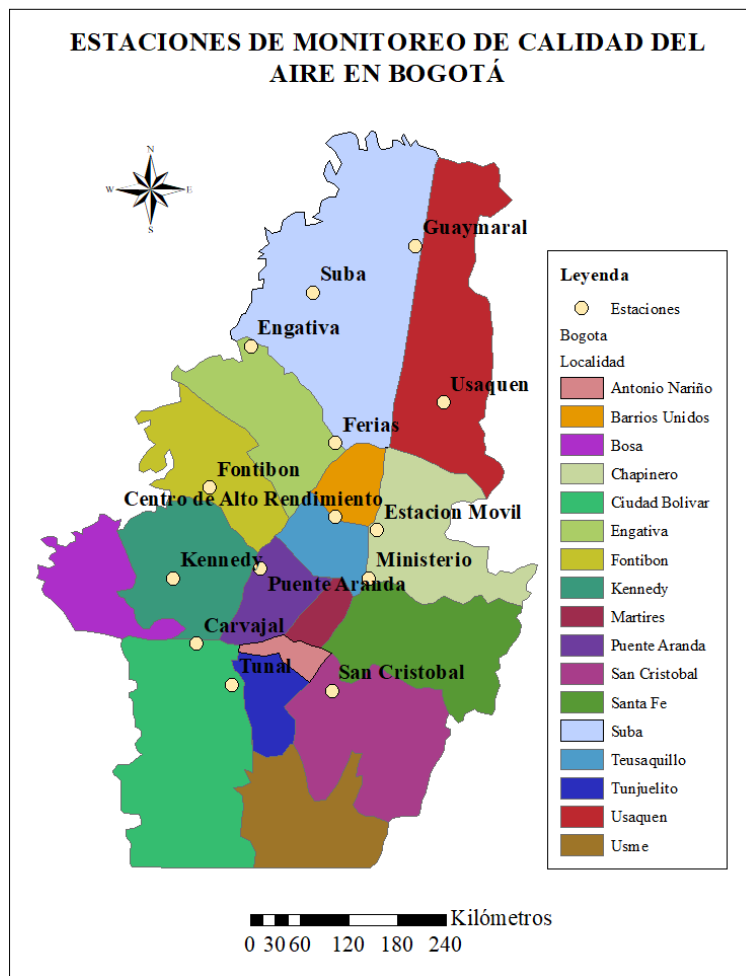
Fuente: Elaboración propia con referencia en las políticas, planes y/o acciones para disminuir la contaminación del aire en Bogotá y Colombia

También, se debe tener en cuenta que se utilizó la Guía de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado actualizada para el año 2005, con el fin de analizar la concentración del PM_{2.5} con base al límite dado por la Organización Mundial de la Salud.

5.6. Marco Geográfico

A modo de contextualización se puede observar en el mapa 1, las estaciones de monitoreo de calidad del aire en Bogotá ubicadas a lo largo del territorio y en sus respectivas localidades

Figura 3. Mapa de la localización de las estaciones de monitoreo de calidad del aire en Bogotá



Fuente: Elaboración propia con ajustes del mapa establecido por la Secretaría Distrital de ambiente (2013)

El área de influencia general de este proyecto, en primer lugar, es la ciudad de Bogotá, la cual está ubicada en la cordillera Oriental de los Andes sobre el altiplano Cundiboyacense en una altura de 2.630 metros sobre el nivel del mar y con elevaciones que alcanzan hasta 4.050 msnm (Universidad de los Andes, s.f.). Esta ciudad tiene un área total de 1.775 km², incluyendo la localidad de Sumapaz y un área urbana de 307,39 km² (Sociedad Geográfica Colombiana, s.f.). El suelo que constituye el territorio es principalmente proveniente del período cuaternario y antiguamente fue un cuerpo de agua de tipo

lago, de lo cual dan evidencia los humedales que cubren algunos sectores no urbanizados de la sabana (Perilla y Rivera, 2014).

En cuanto al clima, Bogotá se caracteriza por tener un clima frío de montaña determinado por la altitud, cuyas temperaturas oscilan entre los 7 y los 18 °C, con una temperatura media anual de 14 °C. Las temporadas más lluviosas del año son de tipo bimodal, entre abril y mayo, y entre septiembre y noviembre, alcanzando los 114 mm/mes mientras que las temporadas más secas del año se presentan entre diciembre y febrero, y entre julio y agosto, en las cuales durante la noche y la madrugada se presentan fuertes heladas (IDEAM y Alcaldía Mayor de Bogotá, s.f) contribuyendo a la tendencia a los climas seco y semiárido, los cuales son característicos de gran parte de la costa Atlántica, las cuencas de los ríos Sogamoso y Chicamocha el altiplano Cundiboyacense, la cuenca del Río Bogotá parte de los valles del medio y alto Magdalena entre otros (IDEAM, s.f).

En este orden de ideas, se puede mencionar el informe de la Alcaldía Mayor de Bogotá, (2016), realizado en el año 2016 en el que, a partir de una evaluación de precipitaciones anual, se determinó que, a nivel nacional durante el año en cuestión, el déficit en las precipitaciones superior al 75% se registró en los meses de enero, febrero y marzo. Estas circunstancias ocasionaron una reducción representativa de la humedad acumulada sobre las superficies vegetales lo cual desarrolla un espacio favorable para la ocurrencia de incendios forestales especialmente en el primer trimestre del año, incidiendo en gran parte sobre la región Andina, incluyendo Bogotá D.C. (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2016)

Por otra parte, investigaciones han registrado que en diciembre, enero y febrero, en zonas de las regiones Orinoquía, Caribe y en algunas partes de la región Andina, hay una disminución de lluvias e incluso se han llegado a asociar reducciones representativas de las precipitaciones con la manifestación del fenómeno del niño, además, en algunos de estos periodos de tiempo han coincidido en numerosas ocasiones con un incremento de la velocidad de los vientos alisios conformados por vientos del Noreste, que para Bogotá presentan un 17% de ocurrencia con velocidades que oscilan entre los 0,1 y 3,3m/s, no obstante, se pueden presentar velocidades de 3,3 y 5,4m/s por vientos del Sureste, que hacen parte del punto de convergencia cerca de la línea del Ecuador formando la zona de confluencia intertropical⁷ (IDEAM, s.f) y pese a que estos vientos se acentúan en los meses de Julio y Agosto también han sido registrados en los primeros meses del año, estos, se manifiestan particularmente desde el Este del Caribe, el Noreste de la Orinoquía y en parte de la región Andina, lo cual ha aumentado las condiciones óptimas para la ocurrencia de incendios forestales sobre la cobertura vegetal dentro de estas regiones. Aun así, se debe tener en cuenta que especialmente en los Valles interandino y en las áreas de carácter montañoso, las circunstancias del relieve y radiación solar, son los factores que definen en gran medida la dirección y la velocidad del viento y por ello no es posible determinar una tendencia definida por parte de estos vientos (IDEAM, 2019). Aunque se tienen estos registros que permiten observar una tendencia en el régimen de vientos de Bogotá, se deben tener en

⁷ Es el encuentro de los vientos provenientes del noroeste del hemisferio norte y de los vientos del suroeste del hemisferio sur (Rodríguez, Benito y Portela, 2010).

cuenta las posibles alteraciones por las brisas valle-montaña que han generado vientos del oeste con 13% de incidencia cuyas velocidades van entre 0,1 m/s y 7,9 m/s (IDEAM, s.f). Las observaciones de estos factores exógenos se deben tener en consideración al momento de analizar las posibles fuentes del contaminante PM_{2.5}, ya que, si se registra algún valor del contaminante estudio atípico y las condiciones de la estación en cuestión no son consecuentes con el resultado, se podrían contemplar factores externos como los incendios forestales o vientos procedentes de otros espacios geográficos que pueden arrastrar material particulado, tal es el caso de los resultados evidenciados en una investigación realizada por el IDEAM donde en el año 2014 se observó un transporte del material particulado procedente del desierto del Sahara según fotografías satelitales tomadas por el satélite Suomi NPP de la NASA (IDEAM,2016).

En cuanto al factor demográfico, Bogotá se caracteriza por presentar un descenso de la tasa de mortalidad y alta tasa de natalidad (DANE, 2019). Actualmente, en Bogotá hay 7.181.469 habitantes según la población censada en el año 2018 (DANE, 2018).

En términos de transporte, que es uno de los factores a analizar, en Bogotá, existe una amplia malla vehicular que comprende numerosas fuentes de emisión por causa de la reducida tecnología con la que cuentan la mayoría de los vehículos, especialmente los de transporte público. Para el 2015, en la ciudad de Bogotá, el total del parque automotor registrado fue de 2'148.541 vehículos. De acuerdo con el tipo, la mayoría es de servicio particular con un 93,91% del total, que representa 2.017.779 unidades, y el servicio público con un 5,30%, que representa 113.856 unidades (Secretaría Distrital de movilidad, 2015).

Asimismo, el Registro único Nacional de Tránsito (RUNT), presentó las cifras referentes a los vehículos contabilizados en el territorio nacional en 2018 incluyendo motocicletas, evidenciando los siguientes resultados: actualmente, existen 14'486.716 automotores en todo territorio nacional de Colombia. De este total, 8'313.954 son motocicletas, es decir, cerca del 57% de todo el parque automotor del país. Según este informe, 480.000 motocicletas están registradas en Bogotá, cifra que corresponde al 67% del parque automotor de la capital colombiana, registrándose como la primera ciudad con más motos en el país Registro Único Nacional de Tránsito (RUNT, 2019).

Para el presente proyecto es de gran importancia tener en cuenta el porcentaje de vehículos de transporte público que existe en Bogotá. En el primer trimestre de 2018, el 65% del parque automotor en servicio, en Bogotá correspondió al transporte tradicional y 35% a los sistemas integrados de transporte masivo (DANE, 2018).

En esta investigación, es relevante mencionar que el servicio de Transmilenio, uno de los medios de transporte más utilizados diariamente y que presenta un incremento de usuarios en la jornada del día sin carro, se sometió a una licitación que se estudió desde el año 2017 con el fin de renovar los buses de las fases I y II, que tienen alrededor de 18 años de uso, por vehículos modernos y con tecnología sostenible. Este proyecto, adjudicó cinco de los seis contratos para renovar la flota, donde el 60 % serán a diésel y el 40 % a gas sin tener en cuenta los eléctricos y por esta razón, el diésel seguirá siendo el combustible predominante en el sistema (Flores, 2018). De los 1.160 articulados y biarticulados que se iban a adquirir, 688 (el 60 %) usarían esta tecnología, los cuales estarían ubicados en los patios de Usme (256 buses) y Tunal (432 buses). Dichos contratos serían otorgados a la Estructura Plural Mc

Masivo y Bogotá Móvil Provisión, respectivamente, y el fabricante de ambos sería la marca sueca Volvo. Los nuevos vehículos, empezarían a funcionar a lo largo del 2019 y tendrían una proyección de duración de diez años (García, 2018).

Una de las razones por las que se realizó la licitación de Transmilenio, fue la actualización del sistema a vehículos con motor Euro V. Las normas Euro, son legislaciones sobre las emisiones contaminantes que promueve la Unión Europea para los vehículos que se comercializan en su territorio (Sánchez, 2010). La primera fue la Euro 0 que se estableció entre 1970 a 1988 y, desde entonces, estas normas y los límites de emisión que proponen, han logrado la dotación en los vehículos, de elementos como los catalizadores de obligada instalación a partir de la Euro 1, establecida en 1992, los filtros de partículas obligatorios en los motores diésel a partir de la aplicación de la Euro V (ONU, 2013). También proponen la instalación de catalizadores SCR con AdBlue, para motores diésel, obligatorios desde la entrada en vigor de la Euro VI. Dichas normas tratan los siguientes contaminantes potencialmente peligrosos para la salud humana: el CO, el NOx, los hidrocarburos no quemados durante la combustión en el motor, y las PM o partículas en suspensión (Lowell y Kamakaté, 2012).

5.7. Marco institucional

La Tabla 5 contiene información acerca de las instituciones que tienen alguna relación con la información utilizada para la elaboración del presente proyecto.

Tabla 5. *Instituciones con información referente al proyecto*

Institución	Descripción con respecto al proyecto
Cámara de Comercio de Bogotá	Una de sus funciones es la elaboración de estudio e investigaciones jurídicas, financieras, estadísticas y socioeconómicas, sobre temas de interés regional y general, que contribuyan al desarrollo de la comunidad y de la región donde operan.
Secretaría Distrital de Ambiente	Provee la información de la red de monitoreo de calidad del aire de Bogotá
Ministerio de Medio Ambiente	A través del SIAC(Sistema de información ambiental de Colombia) genera información sobre las emisiones de contaminantes criterio y su dispersión.
Ministerio de Transporte	Genera información sobre el comportamiento vial en la ciudad y se encarga de definir, formular y regular las políticas de transporte, tránsito y su infraestructura mediante la articulación de las entidades que integran el sector

Fuente: Elaboración propia con referencias de las instituciones mencionadas.

6. Metodología

6.1. Diseño Metodológico

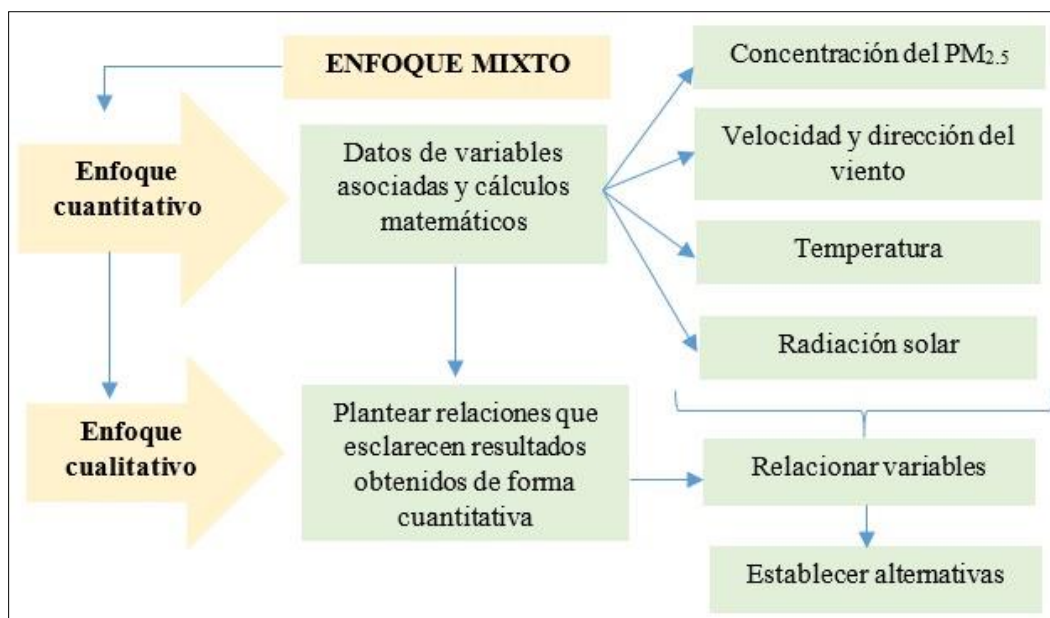
6.1.1. Enfoque

El enfoque del proyecto es mixto debido a que recoge tanto metodologías cuantitativas como cualitativas. La metodología cuantitativa, según Bryman, (1988) citado por Ugalde y Balbastre (2013) es la más apropiada para verificar hipótesis que están fundamentadas en conocimientos ya existentes, donde se tienen datos tangibles y rigurosos, como se evidencia en el estudio de calidad del aire de Gerharz, Krüger, y Klemm (2009), donde a partir de una fase de prueba en la que se rastrearon a seis personas cada 5 segundos con un equipo que guardaba las coordenadas de longitud y latitud del lugar en el que se encontraban, se estableció cuáles de ellas estaban más expuestas al material particulado en Alemania. En otra investigación de este tipo, realizada por Leiva y otros (2013) y explicada en el estado del arte, se hace un análisis del impacto del PM_{2.5} en la salud mediante la recopilación de datos de ingresos hospitalarios, debido a accidentes vasculares encefálicos en Chile, por medio de mediciones de la concentración meteorológica y de contaminantes. Ocurre de la misma forma en el caso de Allen y otros (2012) donde su estudio parte de la recolección de muestras de filtro de PM_{2.5} en interiores y exteriores para evaluar los niveles de exposición en estos dos espacios. Teniendo en cuenta lo anterior, el enfoque cuantitativo, se utilizó en el objetivo número uno, al recopilar los datos de concentración de PM_{2.5}, la velocidad y dirección del viento, la radiación global y la temperatura, para posteriormente mostrar de forma gráfica el comportamiento del contaminante y hacer los respectivos cálculos de altura de capa de mezcla y estabilidad atmosférica.

Por otra parte, el enfoque cualitativo presenta propiedades explicativas y de poder exploratorio (Ugalde y Balbastre, 2013), ya que ayuda a esclarecer los resultados obtenidos en investigaciones cuantitativas, como sucede en el estudio de Gerharz Krüger, y Klemm (2009), mencionado anteriormente, donde la metodología cualitativa se desarrolló a través de unos diarios que debía llenar la población de estudio durante al menos un día hábil y un día de fin de semana, proporcionando sus perfiles de actividad diaria y las ubicaciones geográficas asociadas, con el fin de relacionar esta información con los datos cuantitativos. Por su parte, la investigación de Allen y otros (2012), también presentó una metodología cualitativa al incluir cuestionarios de pregunta abierta para obtener información sobre las características de las residencias y el comportamiento de la población dentro de ella para establecer diferencias entre interiores y exteriores. De la misma forma ocurre con el caso de la investigación realizada por Villegas y Parra (2017), citado en el estado del arte, donde se desarrolló un enfoque análogo al del presente proyecto ya que en primera instancia, se ejecutó una campaña de muestreo, en puntos estratégicos de Bogotá con equipos HI-VOL cuya finalidad fue registrar concentraciones de PM₁₀ cada 48 horas durante 2 meses, con los cuales se generaron mapas con rosas de contaminantes para posteriormente relacionarlos de forma cualitativa con fuentes de contaminación presentes en el entorno. Este enfoque cualitativo se pudo evidenciar en el objetivo número dos, puesto que a partir de los resultados cuantitativos obtenidos del primer objetivo se establecieron relaciones donde las variables asociadas influyeron en el nivel de dispersión del PM_{2.5} y con ello en el incremento del nivel de exposición de bici-usuarios y peatones que se movilizaron durante la jornada del día sin

carro. Así mismo, este enfoque se utilizó en el tercer objetivo específico ya que a partir de los resultados encontrados se recomendaron las alternativas para disminuir el nivel de exposición.

Figura 4. Descripción enfoque mixto del proyecto



Fuente: Elaboración propia

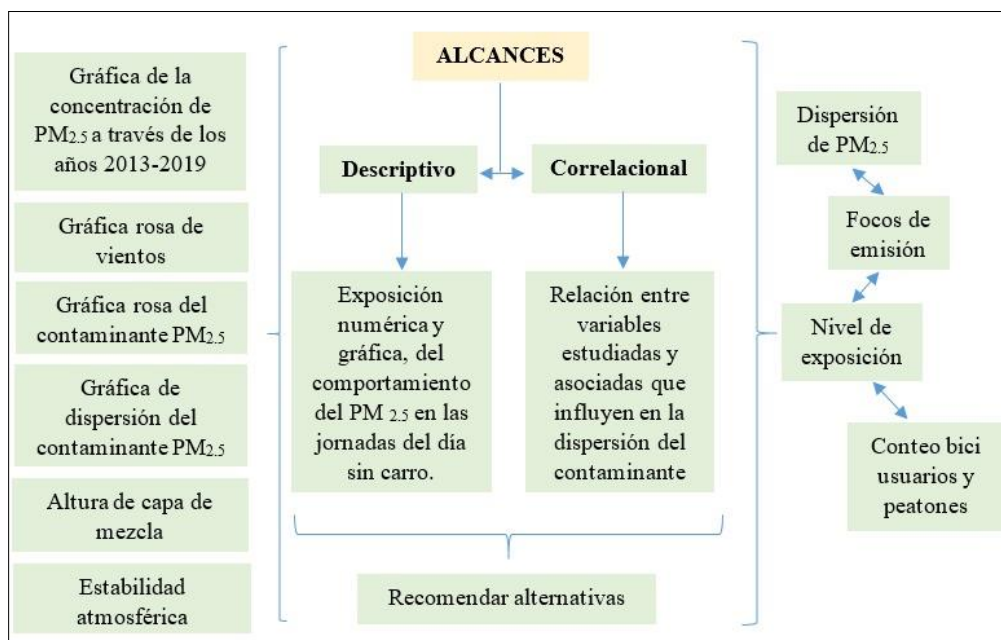
6.1.2. Alcance

El presente proyecto es descriptivo y correlacional. Descriptivo, ya que se ajusta a estudios citados en el estado del arte como el de Venkateswara y Prasad (2010), el cual presenta una comparación detallada entre la combustión en los motores de gasolina, los motores a diésel y los estándares legislativos de los contaminantes emitidos por estos motores. Este alcance también se puede encontrar en la investigación de Rodríguez y Pérez (2017), quien especifica las condiciones que presentan algunos vehículos obsoletos, que pese a sus características y condiciones de emisión de gases contaminantes siguen en circulación. Lo descrito anteriormente da referencia del fin del presente proyecto, el cual es describir el comportamiento del contaminante $PM_{2.5}$ durante las jornadas del día sin carro entre los años 2013 y 2019 en la ciudad de Bogotá, lo cual se puede evidenciar en la ejecución del objetivo número uno.

Además, este trabajo, tiene un alcance correlacional al establecer relaciones entre los factores meteorológicos, las condiciones de emisión y la dispersión del contaminante $PM_{2.5}$, para determinar cómo influyen estos elementos en el aumento o disminución de los niveles de exposición para peatones y bici-usuarios, y así conocer el comportamiento de la variable estudiada a partir de otras variables asociadas para establecer posteriormente las alternativas, lo cual se evidencia en el objetivo número dos y tres. Estudios con este alcance, se evidencia en el artículo de Viard y Fu (2015), citado en el estado del arte, donde se establecieron una serie de relaciones entre la contaminación del aire, las enfermedades cardiovasculares y el efecto que esto tiene en el rendimiento laboral y de la misma forma en la actividad económica de Beijing. Así como en el estudio de Harrison, Laxen y Moorcroft (2012)

en el que se establece una relación directa entre los valores más elevados de $PM_{2.5}$ en algunas localidades de estudio en el norte de Reino Unido con las masas de aire que por la dirección del viento arrastran el contaminante desde las zonas con mayor tráfico.

Figura 5. Descripción del alcance del proyecto



Fuente: Elaboración propia

6.1.3. Método

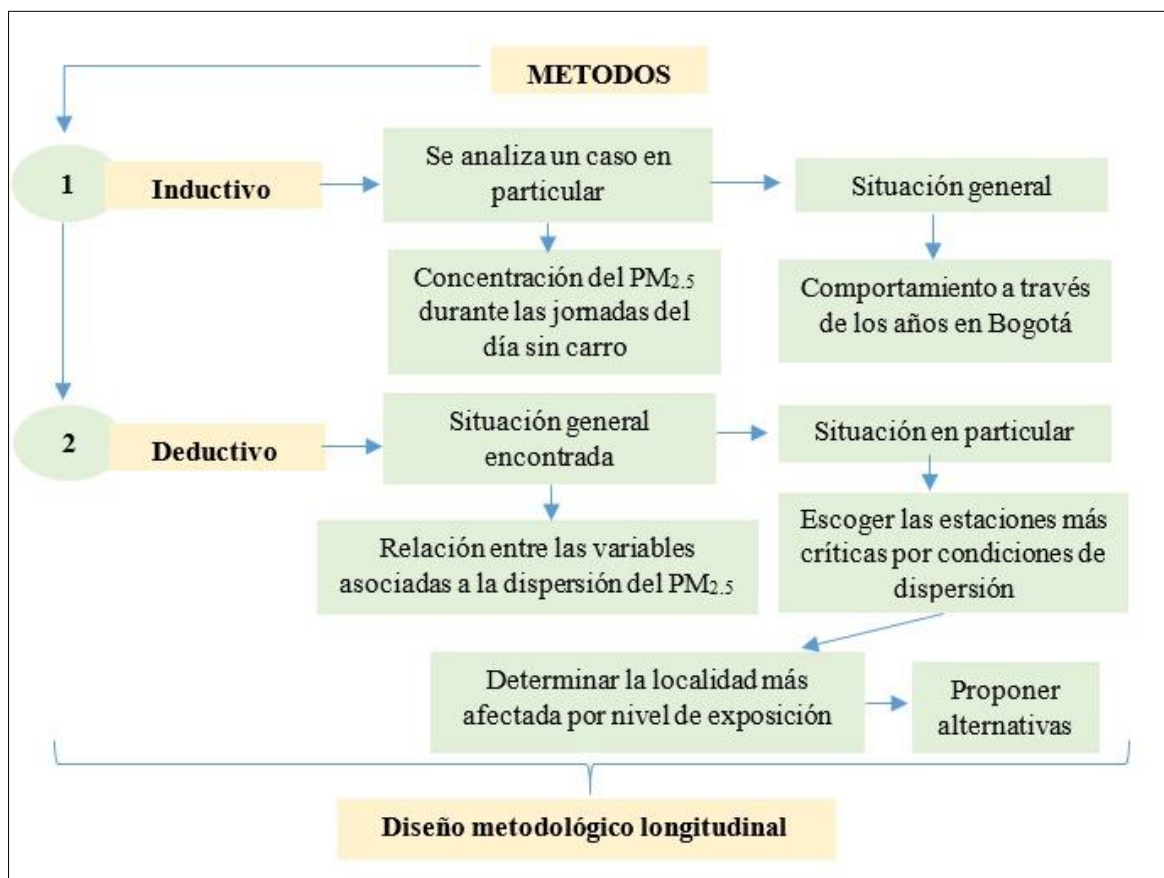
En el proyecto se utilizó el método inductivo y deductivo durante su desarrollo. El método inductivo, se ve reflejado en el objetivo número uno donde se partió de un caso en particular para llegar a abarcar situaciones más generales (Inche, y otros, 2003), en este aspecto el caso en particular fue el estudio del $PM_{2.5}$ en las jornadas del día sin carro para lograr determinar de forma general su comportamiento a través de los años dependiendo de las variables asociadas, así como también lo hicieron algunos estudios desarrollados en los marcos de referencia como el de Yin, Hu, Wang y Wong (2016) donde se recopilan datos de humedad relativa PM_{10} y $PM_{2.5}$ para posteriormente definir estándares de correlación entre ambos elementos incluyendo al factor meteorológico del área de estudio. De la misma forma en el estudio de Castillo, (2018) se grafican datos de concentración de $PM_{2.5}$ de diferentes puntos con el aplicativo Openair y a partir de diagramas polares de la zona se determinó el nivel de contaminación atmosférica de la provincia de Sancti Spíritus.

En cuanto al método deductivo, se empleó en el objetivo número dos y tres, porque se partió de la situación general encontrada en los resultados del objetivo número uno para volver a un caso en particular, es así como se determinaron las relaciones entre las variables y se escogieron las estaciones más afectadas para analizar la dispersión del contaminante y de allí establecer la exposición para la localidad más crítica. De la misma forma que diferentes investigaciones como la de Villegas y Parra

(2017) en la que se hizo un reconocimiento espacial para determinar puntos críticos que mantenían la concentración de PM_{10} y posteriormente se identificaron las fuentes de emisión principales. También está el ejemplo de Matus y Leiva (2013) quienes comenzaron por estudiar los niveles de emisión de material particulado en zonas críticas para después determinar la incidencia de este en una pequeña muestra poblacional a través de registros de ingresos hospitalarios en algunas instituciones seleccionadas.

Es importante resaltar que el diseño del proyecto correspondió a uno *longitudinal* (Inche, y otros, 2003), donde se analizó el problema a través del tiempo por medio de tendencia, cohorte y panel. En cuanto a tendencia, se describió una muestra, analizando sus cambios, que en este caso son los datos del contaminante $PM_{2.5}$ en las jornadas del día sin carro, de allí se escogió una cohorte que se conformó por el estudio de cuatro estaciones de calidad del aire, las cuales fueron Kennedy, Carvajal, Puente Aranda y Tunal al presentar las condiciones más críticas de dispersión del contaminante para posteriormente conformar un panel, donde se identificó la población afectada y se focalizó el estudio en un grupo correspondiente a bici-usuarios y peatones para determinar la exposición ante el contaminante $PM_{2.5}$ en la localidad de Kennedy.

Figura 6. Descripción del método del proyecto



Fuente: Elaboración propia

6.1.4. Unidad de análisis

La unidad de análisis establecida para el presente proyecto, se instauro a partir del fenómeno que se analizó, el cual es el comportamiento del PM_{2.5}, en las jornadas del día sin carro durante el periodo de los últimos siete años, teniendo en cuenta las variables meteorológicas y de emisión. Por otra parte, se puede señalar que también se encontró una unidad de análisis territorial, correspondiente a la ciudad de Bogotá y las estaciones de monitoreo de la calidad del aire.

6.1.5. Muestra y población

Para efectos de este proyecto la población fue representada por las estaciones de monitoreo de calidad del aire de Bogotá y la muestra fueron las estaciones escogidas durante cada jornada para realizar el estudio, así como las fechas del día sin carro de cada año, las cuales se pueden observar en la Tabla 6. La elección mencionada de las estaciones se realizó por el criterio de disponibilidad de datos, es decir, se hizo uso de los datos reportados de las estaciones que en el momento de la jornada del día sin carro estaban midiendo la concentración del PM_{2.5}, cabe aclarar que no se recopilaron los datos de la estación móvil séptima puesto que esta estación no estaba disponible en la plataforma. A continuación, en la Tabla 7 se pueden observar las estaciones escogidas para cada año, de las cuales se recopilaron los datos de velocidad y dirección del viento, temperatura y la concentración de PM_{2.5}.

Tabla 6. Jornadas del día sin carro en la ciudad de Bogotá para el periodo 2013 a 2019

Año	Día sin carro
2013	7 de febrero
2014	6 de febrero
2015	5 de febrero
	22 de abril
	22 de Septiembre
	22 de septiembre
2016	4 de febrero
2017	2 de febrero
2018	1 de febrero
2019	7 de febrero

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7. Estaciones de monitoreo de la calidad del aire escogidas para cada jornada del día sin carro

Estación	FECHAS								
	2013	2014	2015-1	2015-2	2015-3	2016	2017	2018	2019
Carvajal	-	x	x	x	x	x	x	x	x
Centro de Alto Rendimiento	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Fontibón	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	x
Guaymaral	-	-	x	x	x	x	x	x	x
Kennedy	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Ferías	-	x	x	-	x	x	x	x	x
Ministerio del Medio Ambiente	-	-	x	x	x	x	x	-	x
Puente Aranda	-	-	-	-	-	-	x	x	x
San Cristóbal	-	-	x	x	x	x	x	x	x
Suba	-	-	x	x	x	x	x	x	x
Tunal	-	x	x	x	x	x	x	x	x
Usaquen	-	x	x	x	x	x	x	x	x

*Nota: La (x) representó aquellas estaciones que midieron el contaminante, la (-) las que no midieron el contaminante y (NA) las que no se encontraban funcionando y por lo tanto no midieron ninguna variable como es el caso de la estación de Fontibón.

Fuente: Elaboración Propia

La variable de radiación global no se midió en algunas de las estaciones mencionadas en la anterior tabla, por tal motivo se tomaron los datos de estas variables de las estaciones que la midieron y se calculó matemáticamente para aquellas que no midieron la variable, lo cual se explicara más adelante en el apartado de plan de trabajo. En la Tabla 8 se puede observar la distinción dada de la medición de Radiación global para cada una de las estaciones.

Tabla 8. Mediciones de radiación solar en las estaciones de monitoreo de la calidad del aire

Mediciones de Radiación Solar	FECHAS								
	2013	2014	2015-1	2015-2	2015-3	2016	2017	2018	2019
Carvajal	N/A	NRG	NRG	NRG	NRG	NRG	NRG	NRG	NRG
Centro de alto rendimiento	RG	RG	RG	RG	RG	RG	RG	RG	RG
Fontibón	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	NRG
Guaymaral	N/A	N/A	RG	RG	RG	RG	RG	RG	RG
Kennedy	RG	RG	RG	RG	RG	RG	RG	RG	RG
Ferías	N/A	NGR	NGR	NA	NGR	NGR	NGR	NGR	NGR

Ministerio del Medio Ambiente	N/A	N/A	NGR	NGR	NGR	NGR	NGR	N/A	NGR
Puente Aranda	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	NRG	NRG	NRG
San Cristóbal	N/A	N/A	RG	RG	RG	RG	RG	RG	RG
Suba	N/A	N/A	NRG	NRG	NRG	NRG	NRG	NRG	NRG
Tunal	N/A	RG	RG	RG	RG	RG	RG	RG	RG
Usaquén	N/A	NRG	NRG	NRG	NRG	NRG	NRG	NRG	NRG

*Nota: (N/A) representa aquellas estaciones que no midieron PM_{2.5} y por lo tanto no se necesitaron los datos de radiación global, (NRG) son aquellas que no midieron radiación solar y (RG) son aquellas que si midieron la variable.

Fuente: Elaboración propia

6.1.6. Informante, número y calidad

Los informantes se vieron reflejados en las bases de datos construidas para el manejo de la información, las cuales fueron distribuidas de la siguiente forma:

- Una base de datos con información correspondiente a la estación de calidad del aire, el día de la medición, la hora de la medición, la concentración de PM_{2.5} en $\mu\text{g}/\text{m}^3$, la velocidad del viento en m/s y la dirección del viento en grados, con un total de 6 columnas y 1825 filas. Con la cual se pudo realizar el manejo estadístico de los datos de calidad del aire.
- Una base de datos con información correspondiente a la estación, el día, la hora, la radiación global en W/m^2 y la temperatura en grados Celsius, con un total de 5 columnas y 1825 filas. Con la cual se iniciaron los cálculos matemáticos para determinar la altura de capa de mezcla.
- Con la información anterior, se construyó una base de datos de la estación, el día, la hora y la altura de capa de mezcla en metros, con un total de 4 columnas y 1825 filas.
- Para determinar la estabilidad atmosférica, se construyó una base de datos con información de la estación, el día, la hora, la velocidad del viento en m/s, la radiación global neta en W/m^2 , la clasificación numérica según Turner y la categoría de estabilidad de Pasquill- Gifford. Con un total de 7 columnas y 1825 filas.
- Una base de datos para analizar la exposición al PM_{2.5} con la información de la estación, el día, la hora, la dirección del conteo, la cantidad de peatones y/o bici-usuarios. Con un total de 5 columnas y 61 filas.

6.1.7. Matriz de variables

Esta matriz contiene las variables estudiadas en el proyecto, clasificadas en las dimensiones ecológicas, sociales y económicas.

Dimensión ecológica – Matriz aire

Tabla 9. Variables de la dimensión ecológica

Variable	Aspecto de la variable	Indicador	Técnica	Instrumento
PM _{2.5}	Concentración de PM _{2.5}	(µg de PM _{2.5})/m ³	Recolección de datos	Base de datos
Viento	Velocidad	m/s	Recolección de datos	Base de datos
	Dirección	Grados	Recolección de datos	Base de datos
Radiación solar	Radiación global	W/m ²	Recolección de datos y cálculos matemáticos	Base de datos y hojas de calculo
	Radiación Neta	W/m ²	Cálculos matemáticos	Hojas de cálculo
Estabilidad atmosférica	Movimiento de las masas de aire	Categorías de Turner por hora	Categorización de la variable por medio de la metodología Pasquill-Guifford	Hojas de cálculo
Altura de capa de mezcla	Altura convectiva	Metros	Cálculos matemáticos por medio de la metodología para la determinación de altura de capa de mezcla del IDEAM y la EPA	Hojas de cálculo
	Altura mecánica			

Fuente: Elaboración propia

1. Dimensión social - salud

Tabla 10. Variables de la dimensión social

Variable	Aspecto de la variable	Indicador	Técnica	Instrumento
Población expuesta	Número de Peatones	Número de Peatones por hora en el área	Recolección de datos y gráficas	Bases de datos
	Número Bici-Usuarios	Número de Bici-usuarios por hora en el área	Recolección de datos y gráficas	Bases de datos

Fuente: Elaboración propia

Dimensión económica

En este proyecto no se trabajaron directamente variables económicas, sin embargo, se recopiló y consultó información expuesta en los marcos de referencia acerca de cuanto son los costos de salud por temas de enfermedades cardio-respiratorias debido a la contaminación atmosférica por material particulado.

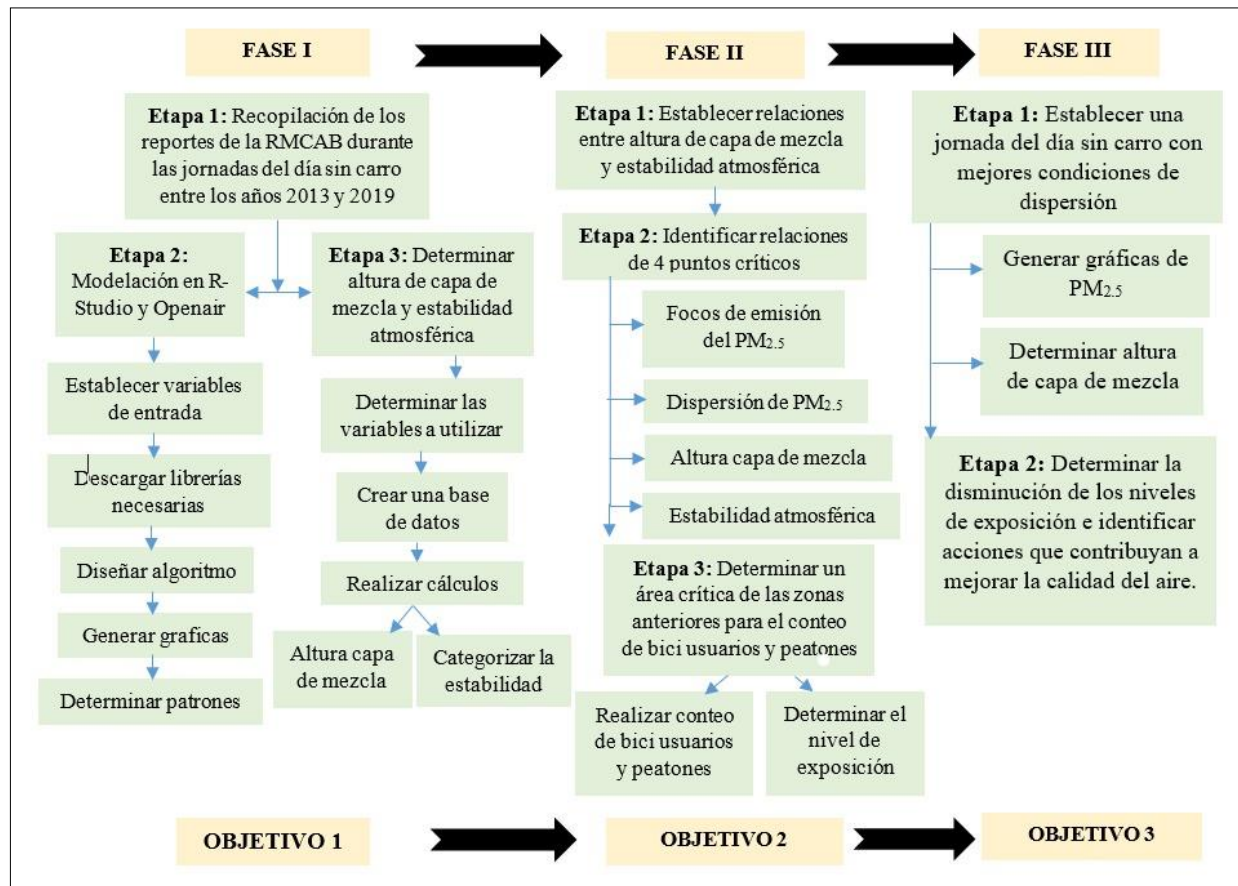
6.2. Plan de trabajo

6.2.1. Fases del proyecto

La descripción del contaminante PM_{2.5} durante la jornada del día sin carro entre los años 2013 y 2019 en la ciudad de Bogotá se llevó a cabo en 3 fases, cada una correspondiente a un objetivo específico planteado. Cabe resaltar, que antes de iniciar con las fases y durante el desarrollo de las mismas se estuvo recopilando información secundaria internacional, nacional y en diferentes idiomas acerca de: a) Las medidas de contingencia para disminuir la contaminación del aire b) El uso de Openair y otros aplicativos para el análisis estadístico de información de calidad del aire c) La forma en la cual factores como la meteorología de una zona pueden determinar la dispersión de los contaminantes al aire en especial del PM_{2.5} y d) Los efectos en la salud de la población que trae consigo la exposición al PM_{2.5}.

En primera instancia se encuentra la fase 1, la cual consistió en recopilar la información generada por la RMCAB durante las jornadas del día sin carro en los años planteados con anterioridad, de las estaciones de Calidad del Aire ubicadas en la ciudad que en su momento se encontraran midiendo el contaminante, posteriormente, estos datos fueron introducidos en R-Studio y por medio del paquete Openair se generaron una serie de graficas que permitieron identificar de manera general el comportamiento del contaminante PM_{2.5}; además, en esta fase se determinó la altura de capa de mezcla y la estabilidad atmosférica hora a hora, debido a que son características que determinan el transporte de contaminantes en la atmosfera. Continuando con la fase 2, en esta se realizaron los análisis correspondientes a los resultados obtenidos en la primera fase, donde, se relacionaron las jornadas del día sin carro con las condiciones meteorológicas y las tendencias de emisión de cuatro zonas priorizadas, de las cuales, se escogió una para analizar la exposición de los bici-usuarios y peatones al PM_{2.5}. Por último, en la fase 3 se establecieron recomendaciones que fomentan la reducción de posibles riesgos por exposición al PM_{2.5} en las jornadas del día sin carro teniendo en cuenta hallazgos y resultados de la investigación, para lo cual se estableció cambiar la fecha del día sin carro a un día que presentara mejores condiciones de dispersión del contaminante. A continuación, se da a conocer el esquema 4 las actividades realizadas en cada fase.

Figura 7. Plan de trabajo del proyecto



Fuente: Elaboración propia

6.2.1.1. Primera fase – Objetivo 1

Esta fase, corresponde al objetivo número uno, el cual es determinar el comportamiento del contaminante PM_{2.5} durante las jornadas del día sin carro entre los años 2013 y 2019 a través de modelos descriptivos estimados con información de la red de monitoreo de calidad del aire de Bogotá. A su vez, se llevó a cabo por medio de varias etapas, las cuales se expusieron en el esquema anterior.

Fase 1 – Etapa 1: Recopilación de los reportes de la RMCAB durante las jornadas del día sin carro entre los años

Para establecer las jornadas del día sin carro entre los años 2013 y 2019 se buscó en la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá en la sección publicaciones los informes de la jornada del día sin carro (RMCAB, 2019). Una vez fueron encontrados, de ellos se extrajo el día en el cual se llevó a cabo la jornada del día sin carro y con esta información se procedió a generar los reportes. Para esto, se ingresó en la pestaña reportes de la RMCAB y allí se escogió la opción MultiStationReport, posteriormente en la tabla que se generó se seleccionó la opción Excel para que la información se descargara en ese formato, así mismo se escogió la opción diariamente y todas las estaciones. Después, en la fecha de inicio y en la fecha final se ingresaron los datos de los días buscados que fueron aclarados en el apartado de muestra y población. Los datos que se utilizaron en este proyecto fueron generados

por cada hora, y con estos, se procedió a realizar una base de datos por cada estación de calidad del aire.

Fase 1 - Etapa 2: Modelación en R-Studio y Openair

Lo primero que se realizó en esta etapa fue cambiar todos los caracteres de comas por puntos, debido a que el lenguaje de R reconoce las comas como una forma de separar las instrucciones y los decimales de los números por puntos (Follos, 2012). Así mismo, se tuvo en cuenta el uso de las mayúsculas y minúsculas cuando se nombraron las variables y la base de datos ya que R las diferencia, además, los datos en el Excel con los cambios mencionados anteriormente se guardaron en formato SVS. A modo de ejemplo en la imagen 3 se puede ver el algoritmo utilizado para el manejo de los datos de la estación de monitoreo Carvajal.

Figura 8. Algoritmo utilizado para analizar los datos de la jornada del día sin carro

```
library(readxl)
carvaj <- read_excel("C:/Users/lulus/OneDrive/Escritorio/Proyecto de grado/Intento RStudio/carvaj.xlsx")
View(carvaj)
carvaj
# Line plot with multiple groups
library(ggplot2)
carvaj$Year <- as.factor(carvaj$Year)
p<-ggplot(carvaj, aes(x=Hour, y=PM, group=Year))+
  geom_line(aes(color=Year))+
  geom_point(aes(color=Year))+
  xlab("Hours") + ylab("PM 2.5 µg/m3 ") +
  ggtitle("Estación de Calidad del Aire de Carvajal")+
  geom_hline(yintercept = 37)+
  geom_hline(yintercept = 25, color=2)
p
library(Openair)
carvaj2019<-carvaj[carvaj$Year==2019,]
windRose(mydata=carvaj2019)
pollutionRose(mydata=carvaj2019,pollutant = "PM")
polarPlot(mydata = carvaj2019,pollutant = "PM", k=1)
```

Fuente: Elaboración propia

Con la *funcion lineplot* y *ggplot2* pertenecientes a RStudio se logró obtener graficas lineales que resumieron la información de cada estación con los datos de las jornadas del día sin carro realizadas en los diferentes años, como la información es robusta con las funciones *geom_line*, *Geom_point*, *xlab*, *ylab*, y *ggtitle* se logró dar estética a las gráficas, es así, como estas funciones permitieron cambiar colores, añadir etiquetas y los títulos de cada una de estas. Asimismo, con la función *windRose* se obtuvo una serie de gráficos que mostraron la variación de la dirección y velocidad de viento por cada estación y a partir de estos resultados se generó la rosa de contaminantes con la función *pollutionRose*, la cual, permitió relacionar, la concentración de los contaminantes con la dirección y/o velocidad del viento (García, 2013). Con las dos graficas anteriores se obtuvo la gráfica de dispersión del contaminante a través de la función *polarPlot*, en la cual se encontró la información de cómo se movía el contaminante a través del tiempo según las variables meteorológicas.

Es importante destacar que se seleccionaron estas herramientas debido a que permiten relacionar más de dos variables, expresar los resultados de manera clara y sus aplicativos son de utilización sencilla. Estas afirmaciones se pueden corroborar por estudios como el de Villegas (2017) en el que se determinó la distribución espacial del PM₁₀, su origen y los cambios de comportamiento que presentó a través del tiempo con el aplicativo Openair, también lo utilizó para resumir de forma gráfica el comportamiento de cada uno de los datos de contaminantes criterio que obtuvo en su estudio. Además de las ventajas que se mencionaron anteriormente, también se deben tener en cuenta las utilidades observadas por Castillo (2018) en su investigación sobre contaminación ambiental, donde especifica que seleccionó esta librería debido a que es una herramienta gratuita, dispone de módulos específicos para el tratamiento de datos de la calidad del aire y presenta instrumentos como polarplot, el cual permite “representar determinado parámetro en función de las distintas combinaciones de dirección y velocidad del viento”(Castillo, 2011, pp.350-351). Otros de los grandes beneficios que ofrece, es la posibilidad de identificar fuentes potenciales de emisión de contaminantes con un alto grado de detalle y la influencia de estas fuentes sobre los niveles generales de contaminación registrados por las estaciones de monitoreo los cuales se puede analizar de manera más completa al observar la rosa de vientos del área que se está estudiando y al poder relacionar la velocidad y la concentración del contaminante estudiado como lo es en este caso el PM_{2.5}. (Castillo, 2018).

Fase 1 - Etapa 3: Determinar la altura de capa de mezcla y la estabilidad atmosférica

Para determinar la altura de capa de mezcla, básicamente se utilizó la Metodología para la evaluación de la capa límite planetaria (IDEAM, s.f), la cual es una guía que da el paso a paso de las ecuaciones y variables a aplicar. Además, se utilizó el informe técnico User's Guide for the AERMOD Meteorological Preprocessor (EPA, 2018) donde se encontró información para corregir variables. Para efectos de este proyecto no se escribieron las ecuaciones utilizadas, sino que se aclararon las constantes, las variables, las correcciones aplicadas y se mencionó el número de la ecuación para que el lector se remita a la Guía del IDEAM.

De forma general, se manejaron tres grandes procesos, el primero correspondió a la construcción del balance energético, el segundo fue determinar los parámetros turbulentos en horas nocturnas y el tercero determinar los parámetros turbulentos en horas diurnas, los cuales se explicarán a continuación.

1) Construcción del balance energético

Esta fue necesaria para determinar la radiación global y neta, las cuales fueron variables indispensables para establecer tanto la altura de capa de mezcla como la estabilidad atmosférica. En algunos casos las estaciones de monitoreo midieron la radiación global, por tal motivo se evitó realizar las primeras 3 ecuaciones y solo se aplicó la cuarta, sin embargo, para aquellas que no midieron la variable se desarrolló el cálculo desde la primera ecuación. En primera instancia se determinó el ángulo de declinación solar, para esto se utilizó la ecuación 1 (IDEAM, s.f), aquí fue necesario determinar el día juliano (d) para cada uno de los días de la jornada del día sin carro. Continuando con el ángulo de elevación solar, el cual es la ecuación número 2 (IDEAM, s.f), se estableció la latitud y la longitud en radianes (Φ y λ_e) de las estaciones de monitoreo de la calidad del aire utilizadas, la hora local en la cual fueron tomadas las mediciones de PM_{2.5} y la hora zonal que para la ciudad de Bogotá es -5. Posteriormente, se determinó la radiación global ecuación número 3 (IDEAM, s.f), en este caso se

utilizó la nubosidad en octavas y para el proyecto fue de 0.8. Por último, se halló la radiación neta ecuación 4 (IDEAM, s.f), usando las temperaturas (T) en kelvin recopiladas de la red de monitoreo, el coeficiente de albedo (α) con un valor de 0.14 el cual fue corregido para cada hora por medio de la ecuación 5.7 de documento (EPA, 2018), además, hay que tener en cuenta que la constante c_1 que se encuentra en la guía del IDEAM es incorrecta lo cual se determinó al obtener resultados erróneos dentro del cálculo y al compararlo con la misma guía metodológica de la EPA, por lo tanto se utilizó el valor $5.31 \cdot 10^{-13}$ (EPA, 2018).

2) Determinación de parámetros turbulentos en horas nocturnas

Este proceso se realizó para el periodo de tiempo comprendido entre las 1-6 horas y las 6-12 horas de las jornadas del día sin carro, debido a que corresponden al horario nocturno y por lo tanto aquí no influye la radiación solar. Este proceso consistió en encontrar la velocidad de fricción⁸, esta variable necesito a su vez de otras como lo son la velocidad del viento en m/s, C , Y C_{DN} , que para hallarlas se tuvo que establecer (Z_r) que corresponde a la altura en metros desde donde se hace la toma de información del viento y (Z_o) que es la rugosidad aerodinámica de la superficie, la cual para la zona urbana toma valores entre 1-1.7 metros, en este caso se escogió 1 m teniendo en cuenta el documento (EPA, 2018), todos los aspectos anteriormente mencionados se encuentran en la ecuación 17 (IDEAM, s.f). Una vez se obtuvo la velocidad de fricción esta se multiplicó por la constante 1330, obteniendo la altura de capa de mezcla mecánica⁹.

3) Determinación de parámetros turbulentos en horas diurnas

Este proceso se realizó para el periodo comprendido entre las 7-5 horas de las jornadas del día sin carro, debido a que influye la variable de radiación solar y por tal motivo se hallaron dos alturas de capa de mezcla una mecánica y otra convectiva¹⁰.

Para la altura de capa de mezcla mecánica, también fue necesario establecer la velocidad de fricción ecuación 8 (IDEAM, s.f), que se vio influenciada por las variables (U_o) ecuación 9 (IDEAM, s.f) la cual necesito de los valores (Z_r), (Z_o) y la velocidad del viento; (Q_o) ecuación 11(IDEAM, s.f) que para hallarla se debió encontrar el calor sensible (H_o) por medio de la radiación global ecuación 5 (IDEAM, s.f), la densidad del aire en Kg/m³ y el calor específico en J/Kg*K tomando el Nitrógeno con una fracción en el aire del 0.79% y el Oxígeno con 0.21%; (Q^*) ecuación 12 (IDEAM, s.f) que utilizo la temperatura en grados kelvin y el valor de (Z_r), también se usó la variable (a) ecuación 13 (IDEAM, s.f) con un valor de 0.107 para hallar la velocidad de fricción y la variable (b) ecuación 14 (IDEAM, s.f) que cambiaba según los valores (Z_r) y (Z_o).

Para la altura de capa de mezcla convectiva, se llevó a cabo la ecuación 36 (IDEAM, s.f) en la que se utilizaron las variables de calor sensible, calor específico y densidad del aire. Esta fórmula tuvo la particularidad de utilizar como una de sus componentes la altura de capa de mezcla de la hora anterior,

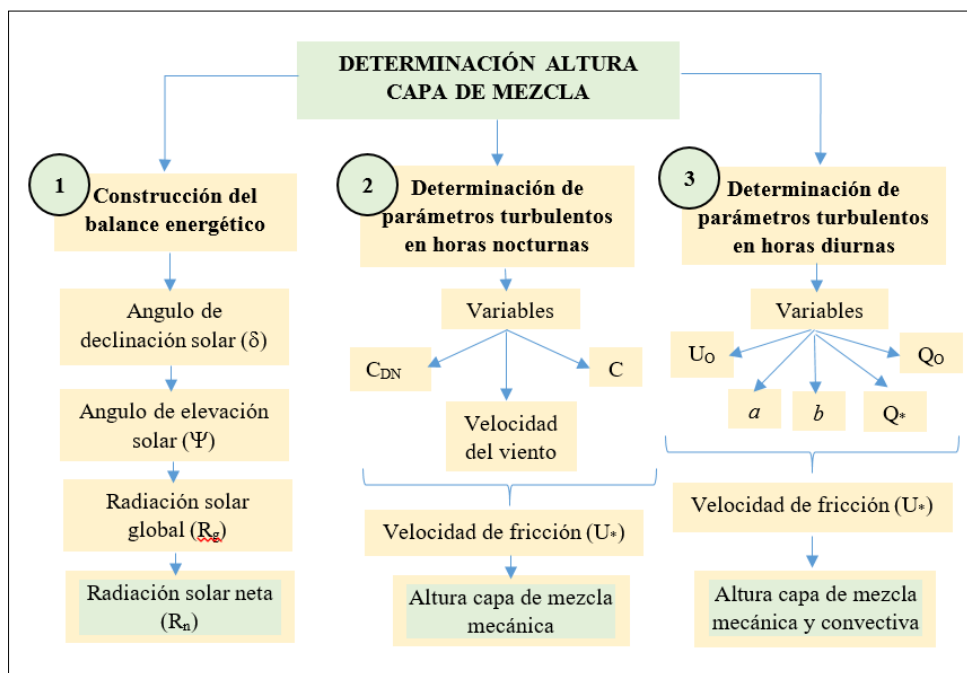
⁸ Acción de retardo en la velocidad del viento al entrar en contacto con la superficie terrestre (Guevara, 2013).

⁹ Altura de capa de mezcla que se da a partir del viento por lo tanto se calcula para la noche y el día (Vicuña, 2017)

¹⁰ Altura de capa de mezcla que se da a partir de la radiación solar y por lo tanto solo se calcula en el día (Vicuña, 2017)

para esto, se partió de la altura de capa de mezcla nocturna resultante para las 6 de la mañana. Además, se debe aclarar que también se retiró de la ecuación la división que se realiza por la altura de capa de mezcla en el segundo término. Una vez se obtuvieron ambos valores, se escogió aquel que fuera el mayor entre las dos alturas. A continuación, en la figura 9 se encuentra de forma esquemática los cálculos matemáticos que se llevaron a cabo.

Figura 9. Determinación altura de capa de mezcla



Fuente: Elaboración propia

En cuanto a la estabilidad atmosférica se utilizaron las categorías planteadas por Turner en la clasificación numérica correspondiente a cada tipo de estabilidad según Pasquill, y el esquema de referencia de Pasquill-Gilford que se presentan en la tabla 11 y 12 obtenidos de la Metodología para la evaluación de la capa límite planetaria y la elaboración del diagnóstico y pronóstico de la estabilidad atmosférica (IDEAM, s.f). Las variables que fueron necesarias para clasificar la estabilidad atmosférica en las jornadas del día sin carro fueron la radiación neta y la velocidad del viento.

Tabla 11. categoría de estabilidad atmosférica Pasquill-Gifford para horas diurnas

Velocidad del viento (m/s)	Radiación Neta (W/m ²)					
	≥ 700	700 – 540	540 – 400	400 – 270	270 – 140	< 140
<2	1	1	2	2	3	4
2 – 3	1	2	2	2	3	4
3 – 4	2	2	2	3	3	4
4 – 5	2	2	3	3	4	4
5 – 6	3	3	3	3	4	4
>6	3	3	4	4	4	4

Fuente: IDEAM (s.f)

Tabla 12. Categoría de estabilidad atmosférica Pasquill-Gifford para horas nocturnas

Velocidad Viento (m/s)	Radiación Neta (W/m ²)		
	≥ -20	(-20) – (-40)	< -40
<2	4	6	6
2 – 3	4	5	6
3 – 5	4	4	5
5 – 6	4	4	4
> 6	4	4	4

Fuente: IDEAM (s.f)

6.2.1.2. Segunda fase – Objetivo 2

En esta fase se analizó la relación del PM_{2.5} en las jornadas del día sin carro con las condiciones meteorológicas, las tendencias de emisión y las características de posibles receptores en vía pública frente al posible cambio de los niveles de exposición

Fase 2 - Etapa 1: Establecer relaciones entre altura de capa de mezcla y estabilidad atmosférica

Una vez se obtuvieron los datos de altura de capa de mezcla y estabilidad atmosférica, se graficaron por medio de RStudio utilizando el código presentado en la primera fase del anterior objetivo, con el fin de identificar la correspondencia entre ambos fenómenos. De estas graficas se pudo observar como la estabilidad atmosférica influye sobre la altura de capa de mezcla, los patrones que se generaron hora a hora, las posibles inversiones térmicas y las estaciones con las alturas de capa de mezcla más altas como las más bajas.

Fase 2-Etapa 2: Identificar relaciones de 4 puntos críticos

Por medio de los resultados hallados y analizados de las gráficas lineales de la concentración de PM_{2.5}, las gráficas polares con la dispersión del contaminante, y las lineales de altura de capa de mezcla y estabilidad atmosférica, se escogieron 4 estaciones de monitoreo de calidad del aire que presentaron condiciones que aumentaban la exposición de bici-usuarios y peatones, en este caso fueron las estaciones de Carvajal, Kennedy, Puente Aranda y Tunal.

Para establecer la relación de focos de contaminación con la concentración de PM_{2.5} en las estaciones seleccionadas para los años 2018 y 2019, se llevó a cabo la sobre posición de las gráficas polares correspondientes, sobre un mapa satelital en el programa ArcGis versión 10.3 en un radio de 150 m, con el fin de identificar los lugares en la zona de estudio que podrían estar generando emisiones de PM_{2.5} como industrias o vías con alto tráfico vehicular y así mismo hacia donde se dirigían por acción del viento. A partir de lo anterior, se definió la relación con la altura de capa de mezcla y la estabilidad atmosférica, haciendo uso de lo analizado en la primera etapa de esta fase, determinando la forma en la cual influyeron estos aspectos en la dispersión del contaminante.

Fase 2 - Etapa 3: Determinar un área crítica de las zonas anteriores para el conteo de bici-usuarios y peatones

Lo primero que se llevó a cabo fue el conteo de bici-usuarios y peatones durante la jornada del día sin carro para el año 2017 y 2018, con el fin de evidenciar la cantidad de personas que durante determinados periodos de tiempo se movilizaba por la localidad y por lo tanto se encontraba expuesta al contaminante. Aunque los análisis de focos de contaminación se realizaron para los años 2018 y 2019, los conteos con los que se trabajó el nivel de exposición correspondieron a los años 2017 y 2018 debido a que no se logró acceder a la información correspondientes al año 2019. En cuanto a las direcciones de los aforos, se utilizaron 3 para bici-usuarios y una para peatones, los cuales se pueden observar en la tabla 13 y 14

Tabla 13. Aforos Bici-usuarios años 2017 y 2018

Aforos Bici-usuarios	
Año	Dirección
2017	AK 72 con AC 6
	AC 45 a sur con KR 50 b
	AK 30 con AV 8 sur
2018	AK 72 con AC 6
	AC 45 a sur con KR 50 b
	AK 86 con CL 2
Aforos peatones	
Año	Dirección
2017	AK 86 con CL 6D
2018	AK 86 con CL 6D

Fuente: Elaboración propia

Para llevar a cabo lo mencionado se consultó en el SIMUR que es el Sistema Integrado de Información sobre Movilidad Urbana Regional en la carpeta de aforos vehiculares-días especiales-día sin carro. De allí se extrajeron las bases de datos correspondientes a los conteos que se realizaron durante un periodo de tiempo en la mañana desde 5 am hasta las 10 am y en la tarde desde las 3 pm hasta las 8 pm. Posteriormente, se procedió a graficar por medio de RStudio versión 3.6.1 el conteo de los bici-usuarios y peatones con el fin de identificar de una forma más visual y sencilla como se comportó el flujo de la ciudadanía durante la jornada y así mismo poderlo relacionar con las demás variables para determinar el nivel de exposición.

6.2.1.3. Tercera fase – Objetivo 3:

En esta fase se recomendaron alternativas que fomenten la reducción de posibles riesgos por exposición a PM_{2.5} en las jornadas del día sin carro teniendo en cuenta hallazgos y resultados de la investigación.

Fase 3 – Etapa 1: Establecer una jornada del día sin carro con mejores condiciones de dispersión

A partir de los resultados obtenidos de los anteriores objetivos se buscaron alternativas que disminuyeran la exposición de bici-usuarios y peatones al contaminante PM_{2.5}. Básicamente, se planteó una alternativa encaminada a cambiar el día sin carro donde se presenten los factores más favorables para la dispersión del contaminante. Para lo anterior, se basó en lo encontrado en la jornada del día sin carro del año 2015-3, debido a que sus resultados fueron buenos en comparación a los demás años. Sin embargo, estas fechas no son las más adecuadas puesto que corresponden a temporadas de lluvias. Es así, como se tomaron los lunes del mes de agosto del año 2018 y 2019 que se pueden ver en la tabla 14, por criterios que se explicaran más adelante en la ejecución del objetivo número tres. Con los datos se procedió a graficar con el programa RStudio versión 3.6.1 y a realizar los mismos cálculos que se llevaron a cabo en el primer objetivo, pero para las fechas anteriormente mencionadas.

Tabla 14. Fechas recomendadas para cambiar la jornada del día sin carro

Año	Fechas recomendadas
2018	6 de Agosto
	13 de Agosto
	20 de Agosto
	27 de Agosto
2019	5 de Agosto
	12 de Agosto
	19 de Agosto
	26 de Agosto

Fuente: Elaboración propia

Fase 3 – Etapa 2: Identificar la disminución de la exposición para bici-usuarios y peatones e identificación de otras alternativas

A partir de los resultados generados de la etapa anterior, se comparó como cambia el comportamiento del PM_{2.5}, y la altura de capa de mezcla con relación a las jornadas del día sin carro expuestas inicialmente para la zona escogida. Básicamente, en esta parte se plantearon las diferencias que incidieron en la exposición de bici usuarios y peatones, soportados con información secundaria y aclarando porque la fecha establecida como alternativa es más adecuada. De igual modo, se recomendaron acciones sencillas que contribuyen a mejorar la calidad del aire no solo en las jornadas del día sin carro, sino también para los días donde hay un flujo vehicular normal.

6.2.2. Resumen de la metodología por objetivos

A continuación, se darán a conocer en las tablas 15, 16 y 17 el resumen del diseño metodológico y el plan de trabajo, cada una de ellas corresponde a un objetivo específico.

Tabla 15. Resumen de la metodología del primer objetivo

Primer Objetivo Específico: Determinar el comportamiento del contaminante PM _{2.5} durante las jornadas del día sin carro entre los años 2013 y 2019 a través de modelos descriptivos estimados con información de la red de monitoreo de calidad del aire de Bogotá.				
Actividades	Técnica	Instrumento	Resultados	
Recopilar de los reportes de la RMCAB durante las jornadas del día sin carro entre los años 2013 y 2019.	Recopilación de datos	Bases de datos	Bases de datos con la información de las variables correspondientes a concentración de PM _{2.5} , velocidad y dirección de viento, temperatura y radiación global.	
Modelar del comportamiento del contaminante PM _{2.5} por medio de RStudio versión 3.6.1 durante las jornadas del día sin carro	Modelamiento	Programa RStudio versión 3.6.1 y la librería OpenAir	Gráficas de líneas y puntos de las concentraciones hora a hora del PM _{2.5} en cada una de las estaciones, rosas de viento, rosas de contaminantes y graficas polares que representan la dispersión del contaminante.	
Determinar la altura de capa de mezcla en las jornadas del día sin carro	Cálculos matemáticos del anexo 10 del IDEAM	Hojas de cálculo	Altura de capa de mezcla en metros por cada hora en las estaciones de monitoreo de la calidad del aire y graficas que lo representan.	
Determinar la estabilidad atmosférica en las jornadas del día sin carro	Clasificación de las categorías según Pasquill-Guifford	Hojas de cálculo	Categorización de la estabilidad atmosférica por cada hora en las estaciones de monitoreo de la calidad del aire y graficas que lo representan.	
Enfoque			Cuantitativo	
Alcance			Descriptivo	
Método			Inductivo	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 16. Resumen de la metodología del segundo objetivo

Segundo Objetivo: Analizar la relación del PM _{2.5} en las jornadas del día sin carro con las condiciones meteorológicas, de emisión y las características de posibles receptores en vía pública como lo son bici usuarios y peatones frente al posible cambio de los niveles de exposición.			
Actividades	Técnica	Instrumento	Resultados
Establecer relaciones entre altura de capa de mezcla y estabilidad atmosférica.	Observación y comparación	Gráficas de altura de capa de mezcla y estabilidad atmosférica.	Relaciones que se presentaron entre la altura de capa de mezcla y la estabilidad atmosférica, tendencias vistas en las gráficas y patrones descritos para cada una de las estaciones de monitoreo.
Identificar relaciones de 4 puntos críticos partiendo de los resultados obtenidos de la dispersión del contaminante, la altura de capa de mezcla y la estabilidad atmosférica.	Observación y comparación	Gráficas de líneas y puntos con la altura de capa de mezcla y estabilidad atmosférica. Gráficas polares con la dispersión del contaminante. Mapas generados en Arcgis 10.3 de las zonas escogidas.	Relaciones entre la dispersión del contaminante, la altura de capa de mezcla, la estabilidad atmosférica y las fuentes de emisión.
Realizar el conteo de bici usuarios y peatones de un área crítica de las zonas anteriores.	Recopilación de datos	Bases de datos.	Bases de datos con la cantidad de bici usuarios y peatones que se movilizaron en las jornadas del día sin carro en los años 2017 y 2018 en 3 direcciones diferentes.
Representar de forma gráfica la cantidad de bici usuarios y peatones.	Descripción gráfica	Programa RStudio versión 3.6.1	Gráficas de líneas y puntos de la cantidad de bici usuarios y peatones.
Determinar exposición de bici usuarios y peatones durante la jornada del día sin carro.	Observación y comparación	Gráficas de líneas y puntos. Relaciones entre factores establecidas con anterioridad.	Análisis de exposición al PM _{2.5} al cual se enfrentan los bici usuarios y peatones en las jornadas del día sin carro.
Enfoque	Cualitativo		
Alcance	Correlacional		
Método	Deductivo		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 17. Resumen de la metodología del tercer objetivo

Tercer Objetivo: Recomendar alternativas que fomenten la reducción de posibles riesgos por exposición a PM _{2.5} en la del día sin carro teniendo en cuenta hallazgos y resultados de la investigación.			
Actividades	Técnica	Instrumento	Resultados
Recopilar los reportes de la RMCAB durante las fechas recomendadas para realizar las jornadas del día sin carro.	Recopilación de datos	Bases de datos.	Bases de datos con la información de las variables correspondientes a concentración de PM _{2.5} , velocidad y dirección de viento, temperatura y radiación global.
Representar de forma gráfica las concentraciones de PM _{2.5} durante las fechas recomendadas.	Descripción gráfica	Programa RStudio versión 3.6.1	Gráficas de líneas y puntos de las concentraciones de PM _{2.5} durante las fechas recomendadas.
Determinar la altura de capa de mezcla en las fechas recomendadas.	Cálculos matemáticos del anexo 10 del IDEAM	Hojas de cálculo.	Altura de capa de mezcla en metros por cada hora en las estaciones de monitoreo de la zona seleccionada y graficas que lo representan.
Determinar la estabilidad atmosférica en las fechas recomendadas.	Clasificación de las categorías según Pasquill-Guifford	Hojas de cálculo.	Categorización de la estabilidad atmosférica por cada hora en zona seleccionada y graficas que lo representan.
Establecer la disminución a la exposición al PM _{2.5}	Observación y comparación	Graficas de líneas y puntos. Relaciones entre factores establecidas con anterioridad.	Análisis de la disminución de los niveles de exposición al PM _{2.5} al tener en cuenta los factores meteorológicos y de emisión.
Recomendar acciones sencillas que contribuyen a mejorar la calidad del aire en Bogotá.	Recopilación de información secundaria y hallazgos de la investigación	Información secundaria y hallazgos	Acciones recomendadas
Enfoque	Mixto		
Alcance	Descriptivo y Correlacional		
Método	Deductivo		

Fuente: Elaboración propia

7. Aspectos Éticos

No Aplica porque no se trabajó con una población de forma directa, por lo tanto, no es necesario realizar compromisos para el manejo de la información privada.

8. Resultados y análisis

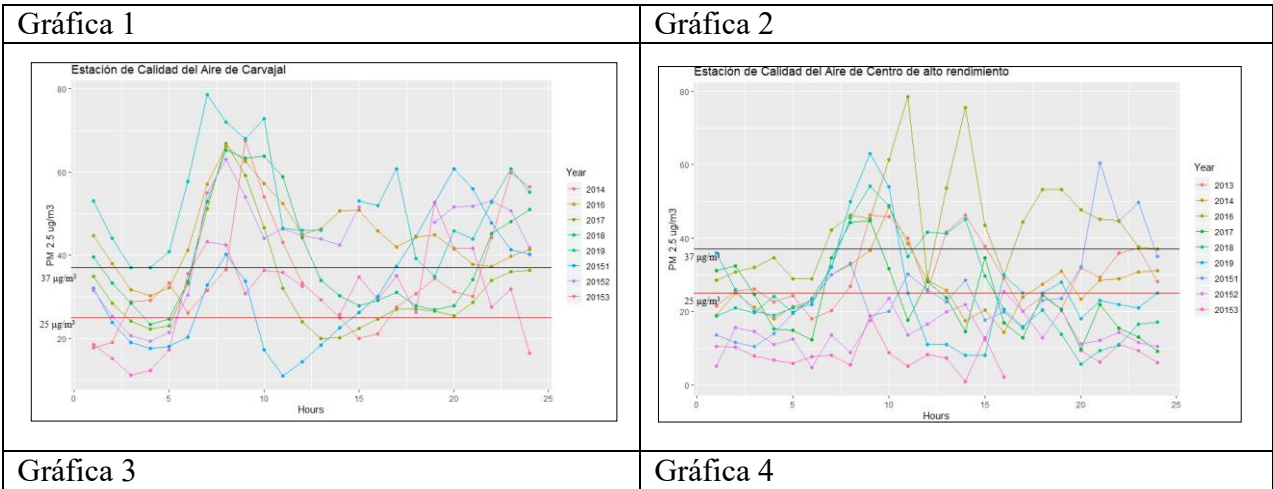
8.1. Resultados y análisis del primer objetivo

En esta sección, se presentarán las gráficas de puntos y líneas de la concentración de PM_{2.5} para cada una de las estaciones durante las jornadas del día sin carro, luego se presenta un ejemplo de la Rosa de vientos y la Rosa de contaminantes correspondientes a la estación de Carvajal, las cuales se encuentran disponibles para todas las estaciones en el anexo uno y dos, estas pueden ser observadas y tenidas en cuenta por el lector a la hora de revisar las gráficas que muestran la dispersión de contaminantes ubicadas en la parte final de este apartado.

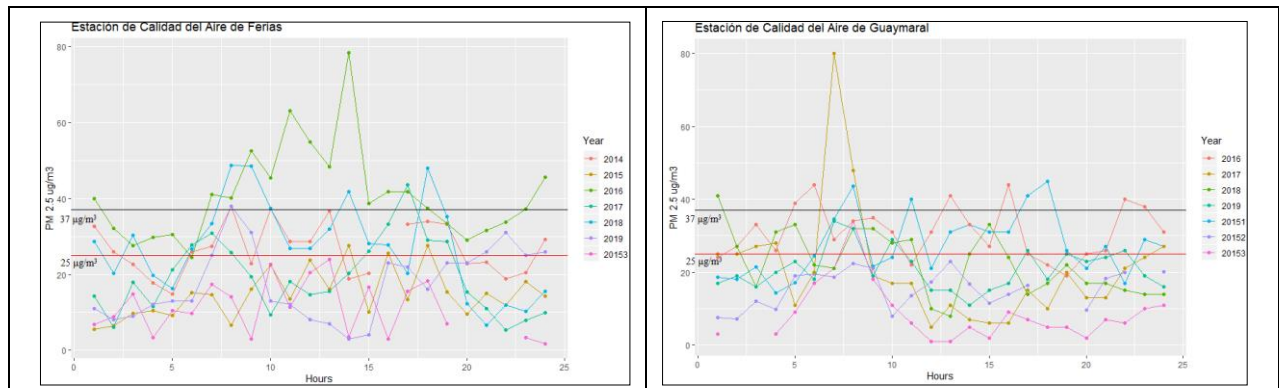
8.1.1. Gráficas de puntos y líneas para las jornadas de día sin carro

A continuación, se va a exponer el comportamiento del PM_{2.5} durante la jornada del día sin carro entre los años 2013 al 2019 representado en gráficas generadas a partir del aplicativo RStudio versión 3.6.1 y la librería de análisis Openair versión 1.4. Los análisis de las gráficas generadas se realizaron teniendo en cuenta los límites permisibles actuales de la normativa colombiana correspondientes a 37 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ representados por una línea horizontal negra y los límites dados por la OMS de 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ representados por una línea horizontal roja. Además, se debe tener en cuenta que cada año graficado presenta colores diferentes para indicar los niveles de PM_{2.5} en la jornada del día sin carro y no se debe generalizar la coloración de las líneas entre gráficas, por ello se recomienda revisar las convenciones de cada una.

Tabla 18. Gráficas del comportamiento del PM_{2.5} durante las jornadas del día sin carro desde el 2013 hasta el 2019 para cada una de las estaciones estudiadas.

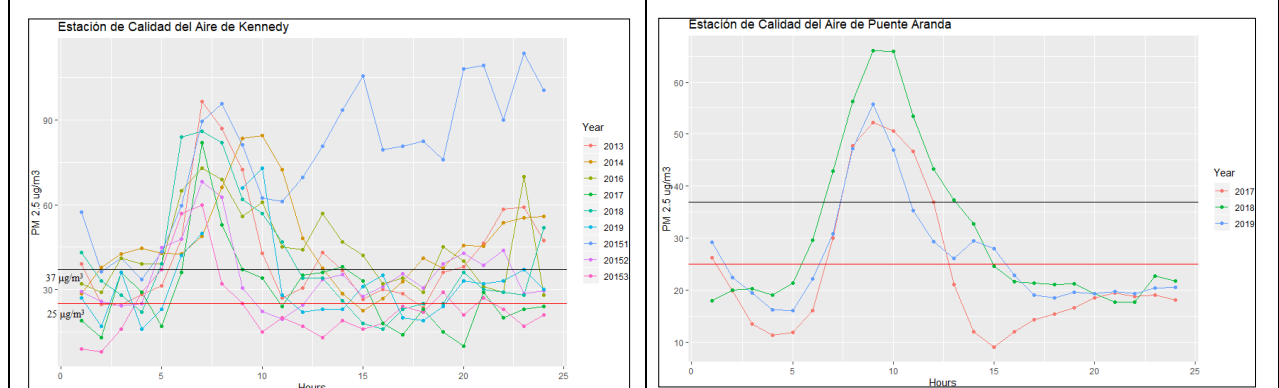


Descripción del comportamiento del contaminante criterio PM_{2.5} durante las jornadas del día sin carro entre los años 2013 y 2019 en Bogotá



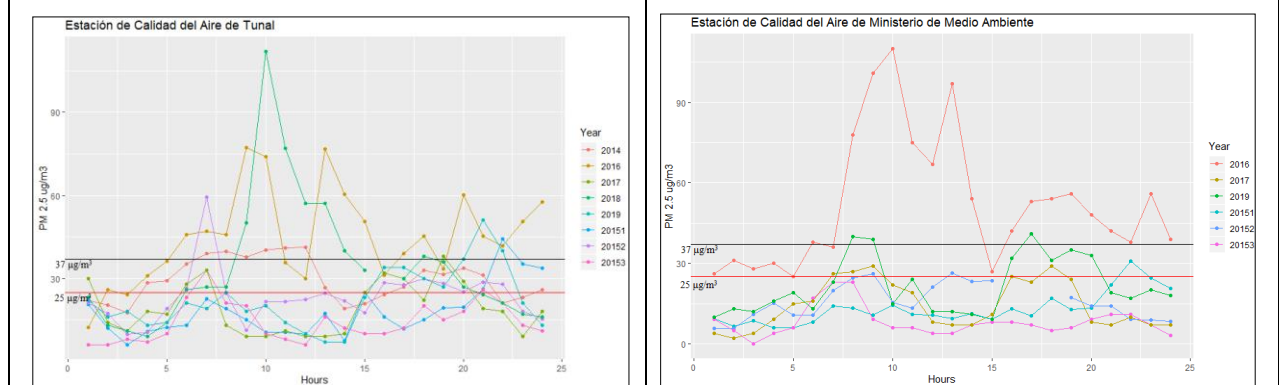
Gráfica 5

Gráfica 6



Gráfica 7

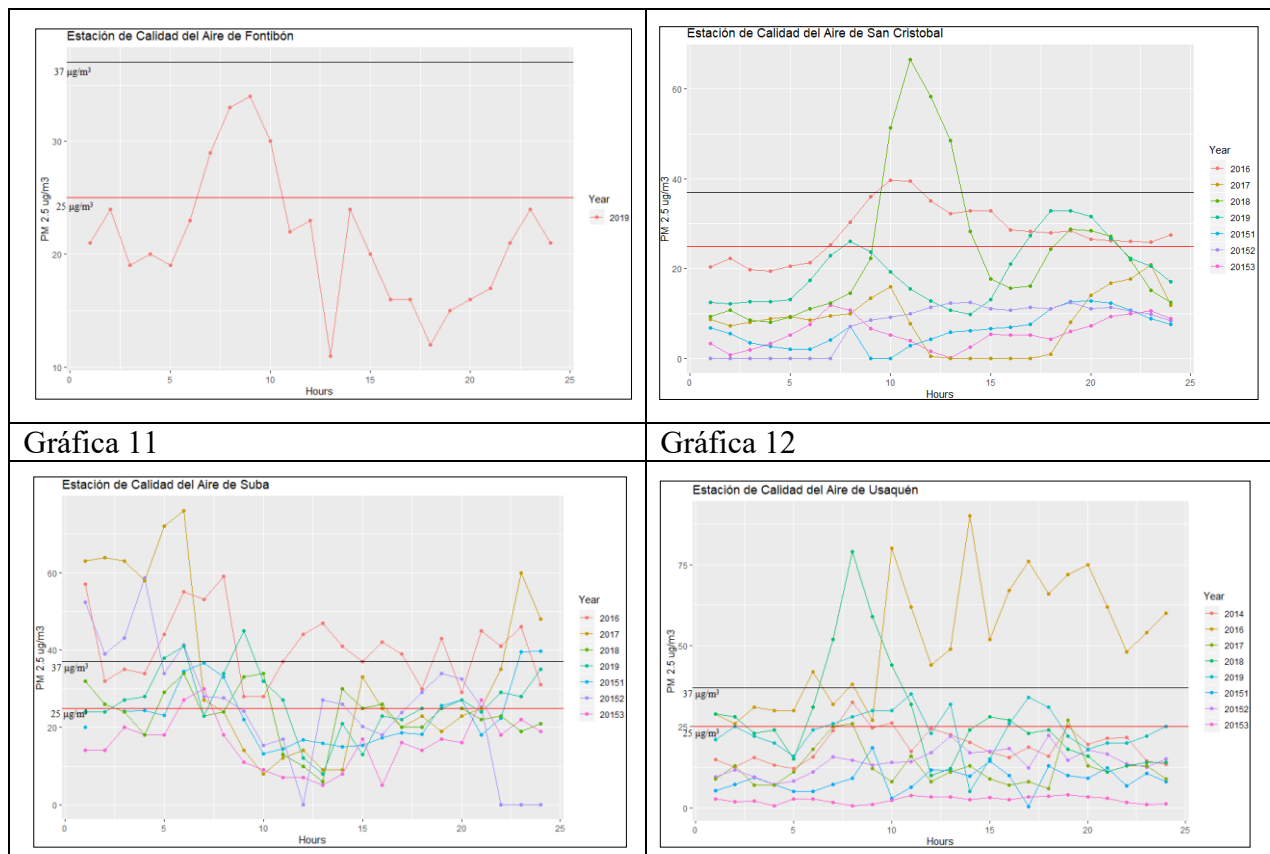
Gráfica 8



Gráfica 9

Gráfica 10

Descripción del comportamiento del contaminante criterio PM_{2.5} durante las jornadas del día sin carro entre los años 2013 y 2019 en Bogotá



Fuente: Elaboración propia

Las gráficas de la 1 a la 12 ubicadas en la Tala 18, permitieron determinar algunos patrones en el comportamiento del contaminante PM_{2.5}. El primero, consiste en un incremento de los valores de concentración en un periodo de tiempo que comienza a las 5 am y termina a las 11 am aproximadamente y que se repite para la mayoría de estaciones de calidad del aire durante el 2013 hasta el 2019, esta es una tendencia que está directamente relacionada con otra observación repetitiva en casi todos los casos y son los valores máximos que alcanza el PM_{2.5} ya que logra superar no solo los valores límite permisibles dados por la OMS sino los presentados por el Ministerio de Ambiente en Colombia.

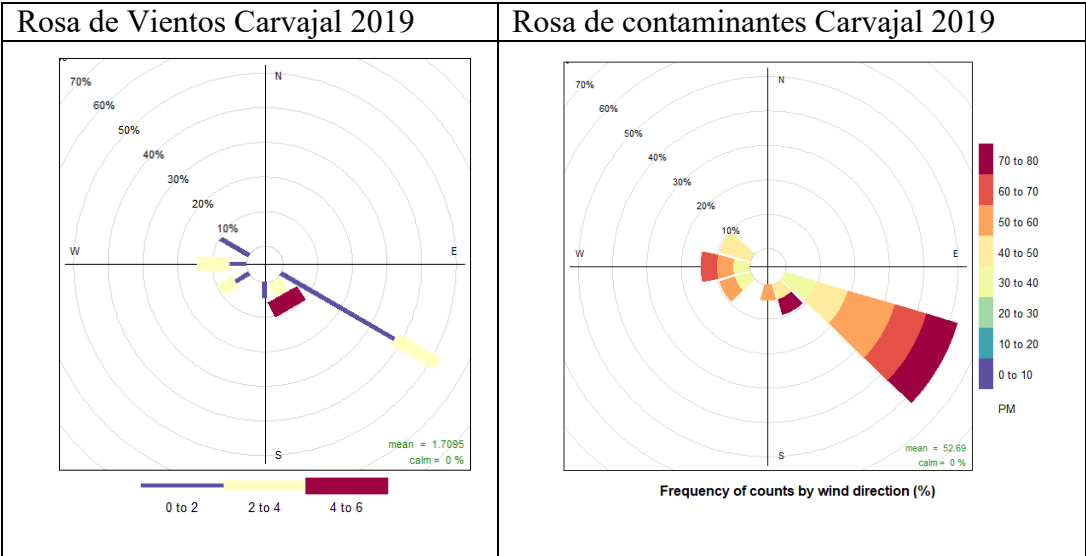
Por otra parte, los años que presentaron valores más elevados de este contaminante y que llegaron a exceder los 80µg/m³ en la mayoría de estaciones fueron el 2016 y el 2018 donde la estación de Kennedy y la estación de Ministerio de Medio ambiente sobrepasaron valores de 100µg/m³, mientras que, en promedio, el mejor comportamiento que incluso se alcanza a mantenerse dentro de los límites permisibles dados por la OMS en algunos casos, fue el día correspondiente al 2015-2 y 2015-3.

8.1.2. Gráficas Polares de dispersión del PM_{2.5} durante las jornadas del día sin carro

A continuación, se van a presentar las gráficas polares donde se relacionan las variables de concentración, frecuencia, dirección y velocidad del viento, las cuales permitieron observar las características principales de dispersión y así determinar cuál es la estación donde el comportamiento del contaminante es más crítico.

Es relevante mencionar, que para obtener las gráficas polares de las 12 estaciones de monitoreo, se obtuvo primero las rosas de viento y las rosas de contaminantes, como se muestra a manera de ejemplo en la Tabla 19, para las cuales fue necesario realizar una serie de algoritmos descritos en el apartado de metodología. Cabe mencionar que tanto las rosas de viento como las de contaminantes se pueden observar a mayor detalle y para cada una de las estaciones en los anexos del 1 al 12 y del 13 al 24.

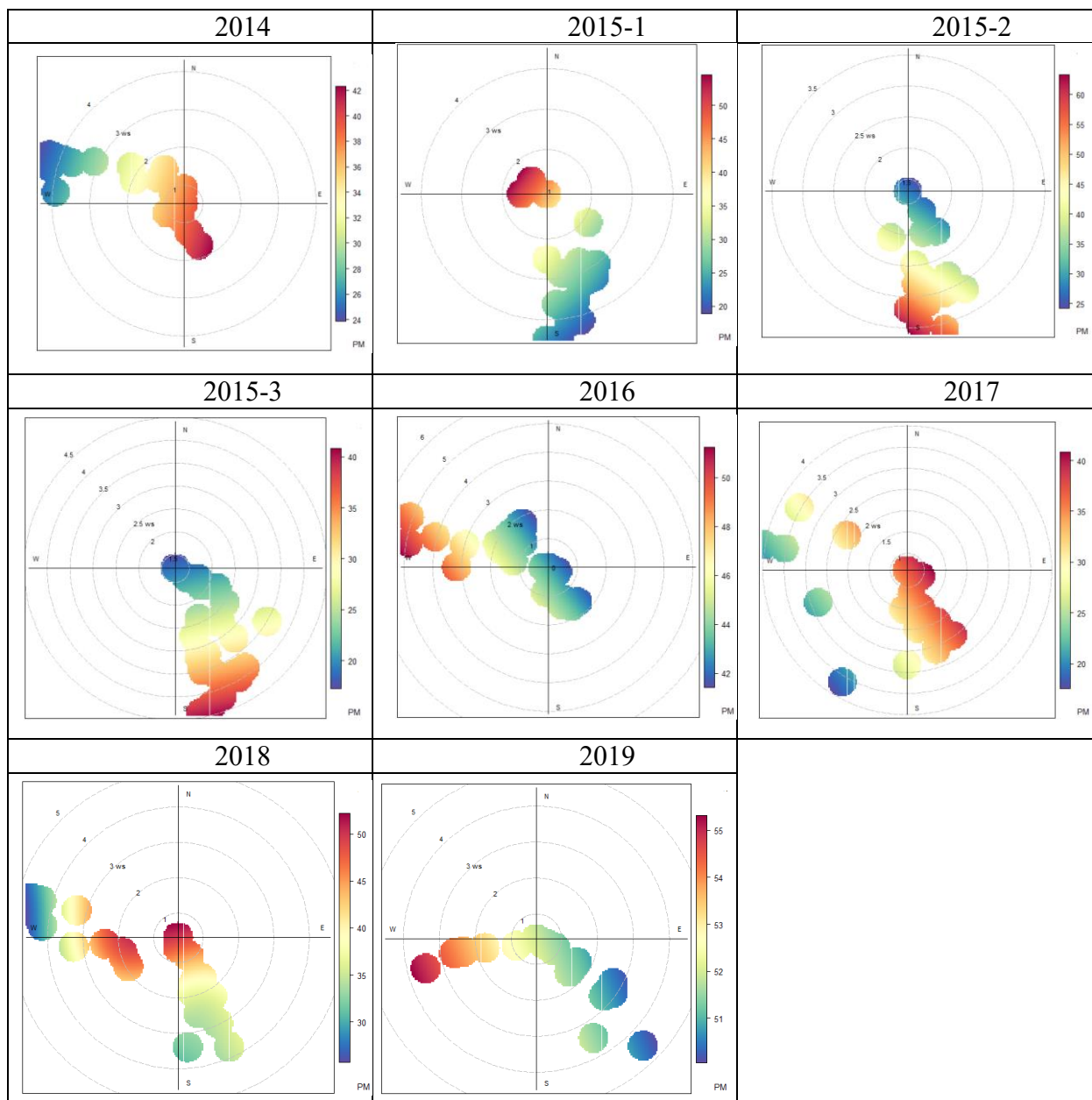
Tabla 19. Ejemplo de Rosa de Vientos y Rosa de contaminantes



Fuente: Elaboración propia

En las siguientes tablas se podrá observar la modelación del contaminante $PM_{2.5}$ influenciado por variables de velocidad, frecuencia y dirección del viento para cada una de las estaciones de monitoreo de calidad del aire durante la jornada del día sin carro desde el año 2013 al 2019.

Tabla 20. Gráficas Polares para la estación Carvajal en el periodo de año 2014 al 2019

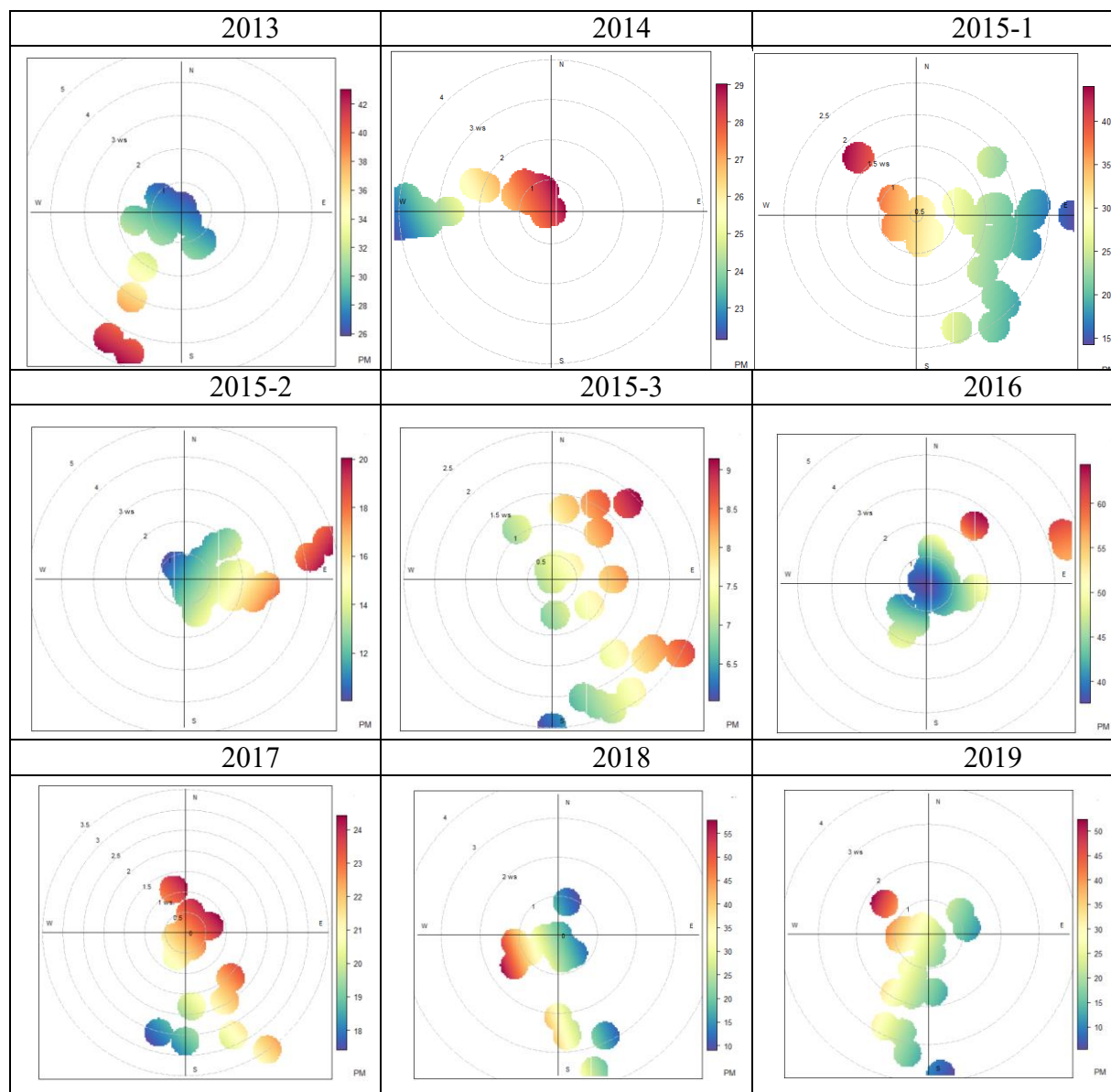


Fuente: Elaboración propia

En la estación Carvajal se puede ver que predominan los vientos desde la dirección Noroeste hacia el Sureste con una tendencia de dispersión del contaminante hacia el sur que observa en los años 2015-1, 2015-2, 2015-3. No obstante, también se presentaron vientos provenientes del Noreste con dirección al Suroeste como en los años 2017, 2018 y 2019. En general, no se observaron altas concentraciones de contaminantes en el área Noreste debido a que no hubo un registro significativo de vientos provenientes del Suroeste. Asimismo, se deben tener en cuenta los registros de la velocidad del viento ya que, en la mayoría de los casos, estos valores fueron bajos, lo cual pudo generar que el contaminante no tuviera una buena dispersión y por ello en los casos donde se presentan altos valores de velocidad, sí se puede ver un claro movimiento del contaminante como ocurre con 2015-3 y 2016.

En cuanto a la concentración de contaminantes en la estación de Carvajal, se puede decir que hay una prevalencia en el área Sureste y en algunos casos en el área Suroeste. Cabe resaltar que en los años 2015-2 y 2019 se registraron los niveles más altos de concentración de PM_{2.5} con resultados por encima de los 50µg/m³ y los años que presentaron los valores de concentración más bajos fueron 2015-3 y 2017 con registros máximos de más o menos 40µg/m³.

Tabla 21. Gráficas Polares para la estación Centro de alto rendimiento en el periodo de 2013 al 2019

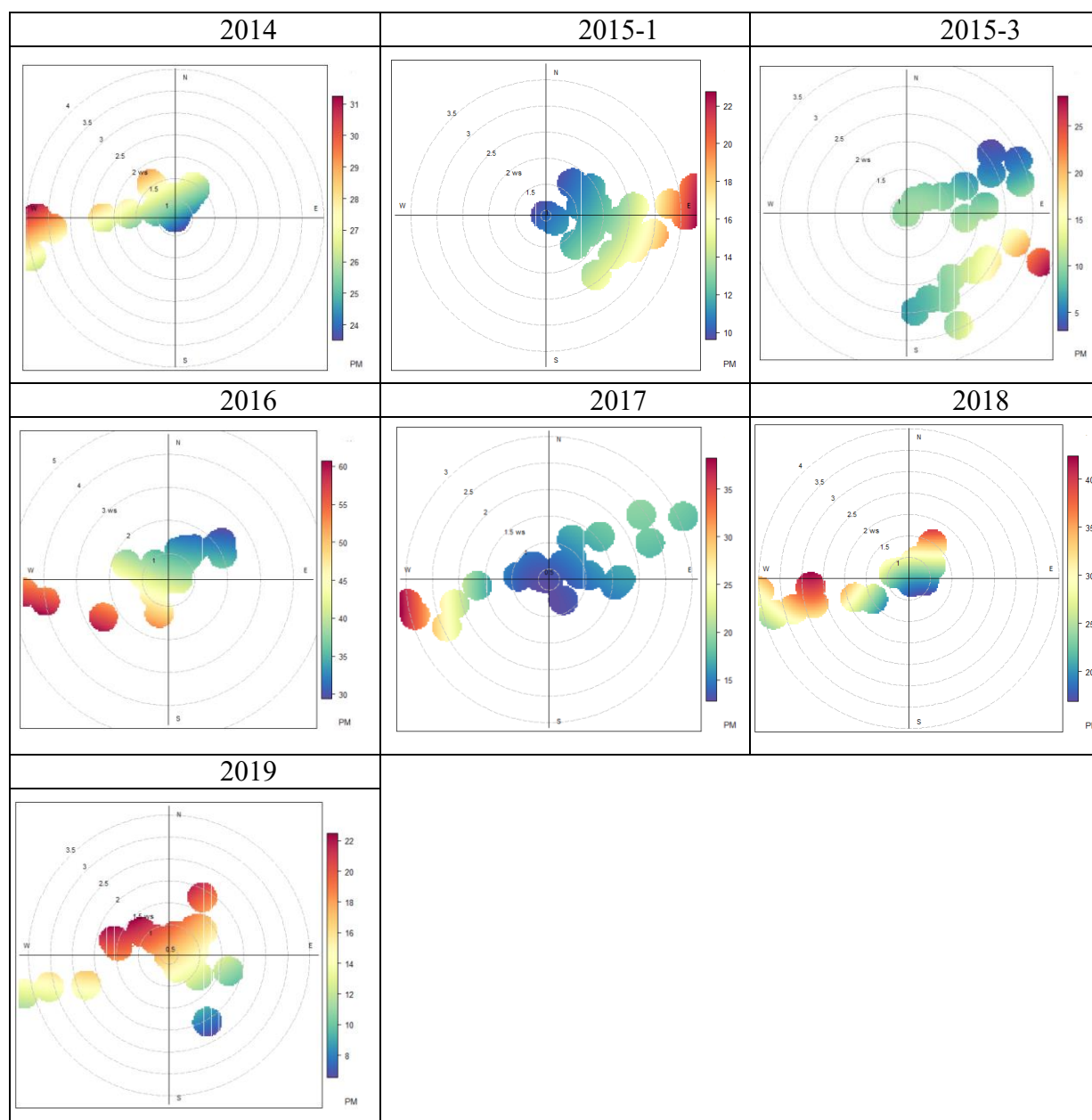


Fuente: Elaboración propia

En las gráficas de dispersión para la estación del Centro de Alto Rendimiento ubicadas en la Tabla 21, predominan los vientos provenientes del Oeste que se dirigen hacia el Este, aunque también presentan algunas tendencias desde el Suroeste hacia el Este, lo cual se puede observar en los años 2015-1, 2015-2, 2015-3, 2017 y 2018. Las restantes presentaron una dirección desde el Noreste hacia el Suroeste como en el caso de 2013 y 2019 con la excepción del 2014 que iba de Este a Oeste. Por

su parte, pese a que se registraron velocidades de vientos de hasta 5m/s, no se percibe una dispersión del contaminante significativa debido a que, posiblemente la frecuencia del viento es baja y a que se puede apreciar cómo la concentración se mantiene alrededor del foco de emisión exceptuando los años 2013 y 2015-2 donde se evidencia el movimiento del contaminante a velocidades entre 4 y 5m/s para ambos casos. A pesar de lo anterior, se puede decir que en general, esta estación presenta concentraciones bajas y no alcanza a mantener niveles críticos, por ejemplo, las concentraciones por m^3 de aire tuvieron un máximo de $10\mu g/m^3$ de $PM_{2.5}$ para el año 2015-3 y, asimismo, se identifica un valor máximo de $65\mu g/m^3$ para el año 2016

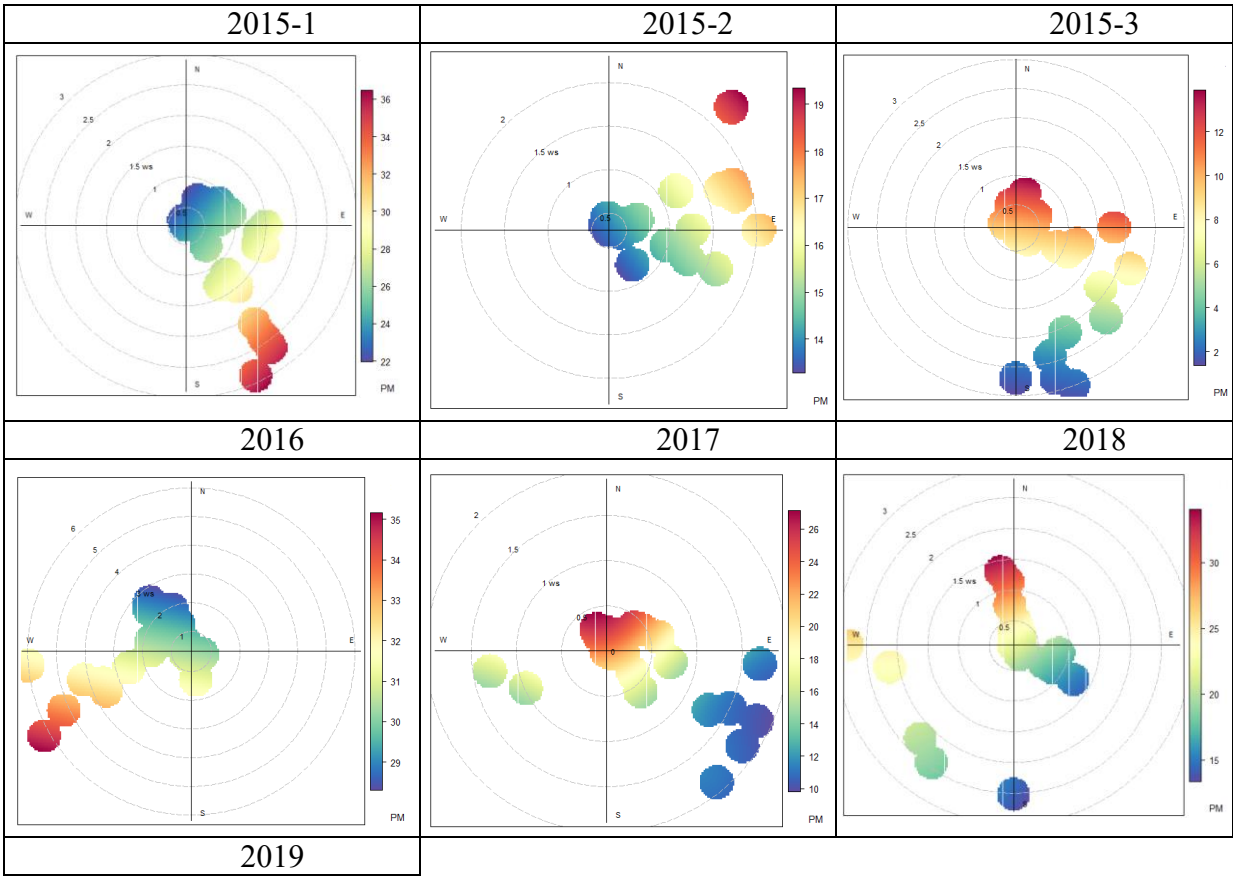
Tabla 22. Gráficas Polares para la estación Ferias en el periodo de 2014 al 2019



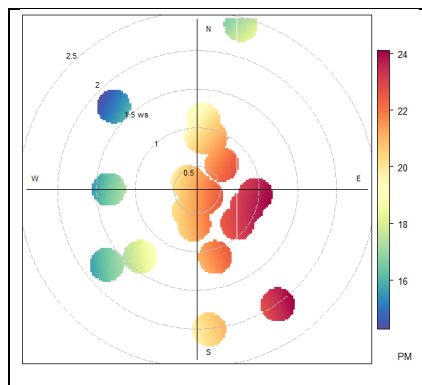
Fuente: Elaboración propia

En general, se puede observar que en las gráficas de la Tabla 22 para la estación Ferias, hay una predominancia de vientos que presentan velocidades entre los 4 y 5m/s, en la mayoría de los casos hacia el Oeste, dispersando hacia esta dirección las concentraciones más altas del contaminante $PM_{2.5}$. Sin embargo, no se logra establecer un patrón de dirección del viento ya que se identifican movimientos en varias direcciones como se puede ver en las rosas de viento ubicadas en el Anexo 1 No obstante, los años en que se registraron los valores más altos de concentración de $PM_{2.5}$ son 2016 y 2018, los casos que presentaron las concentraciones más bajas con respecto a las demás gráficas fueron 20151 y 2019 y aunque los niveles de concentración no alcanzan valores tan altos como en otras estaciones, se evidencia una dispersión baja del contaminante posiblemente a cusa de que las concentraciones más altas, no logran tener velocidades de viento significativas.

Tabla 23. Gráficas Polares para la estación Guaymaral en el periodo de 2015-1 al 2019



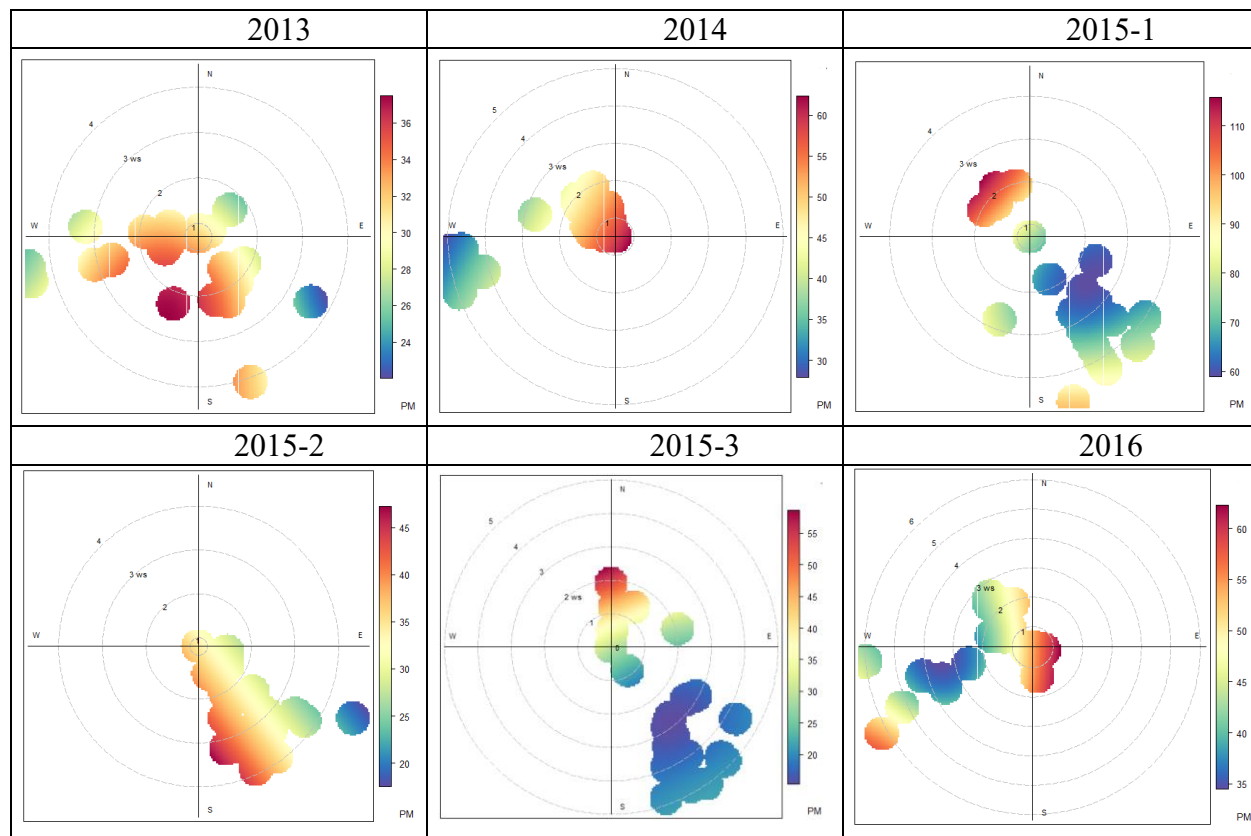
Descripción del comportamiento del contaminante criterio $PM_{2.5}$ durante las jornadas del día sin carro entre los años 2013 y 2019 en Bogotá



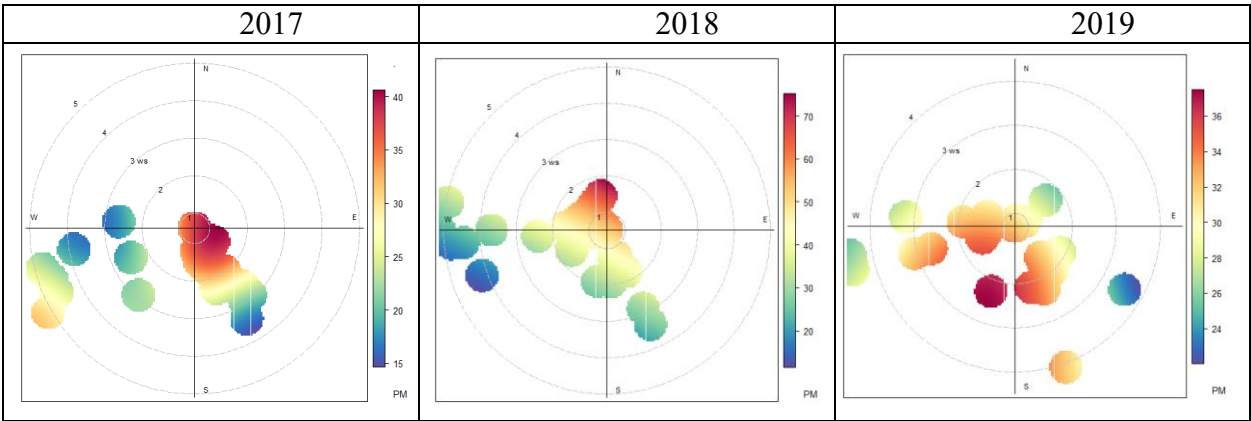
Fuente: Elaboración propia

Para la estación Guaymaral, graficas de la Tabla 23, en primera instancia, se observa un patrón de dispersión de contaminantes desde el Noroeste, principalmente hacia la dirección Sureste y en otros casos se evidencia un movimiento desde el Noreste en la dirección Sur o en dirección Suroeste como es el caso de 2019 y 2016 respectivamente. En general, se evidencia una dispersión baja con velocidades de 0 a 2m/s exceptuando el año 2016 que presentó velocidades de 5 a 6m/s, lo cual permitió el más movimiento del contaminante para este año. Asimismo, se debe mencionar que, en todas las gráficas de esta estación, los valores de concentración de $PM_{2.5}$, fueron bajos manteniéndose por debajo de $40\mu g/m^3$, donde el menor valor fue registrado en el año 2015-3 y el mayor en el 2015-1 con $36\mu g/m^3$.

Tabla 24. Gráficas Polares para la estación Kennedy en el periodo de 2013 al 2019



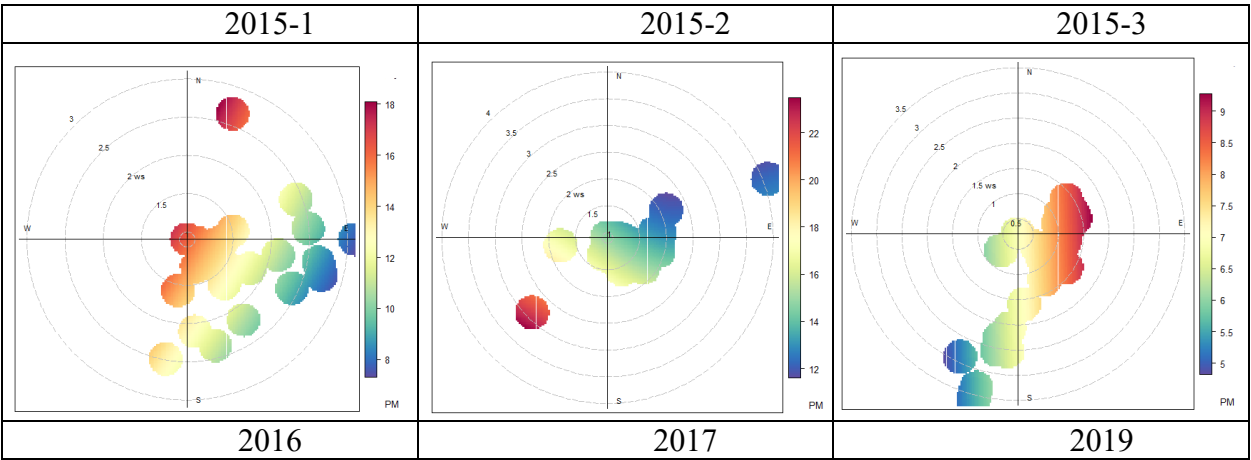
Descripción del comportamiento del contaminante criterio $PM_{2.5}$ durante las jornadas del día sin carro entre los años 2013 y 2019 en Bogotá

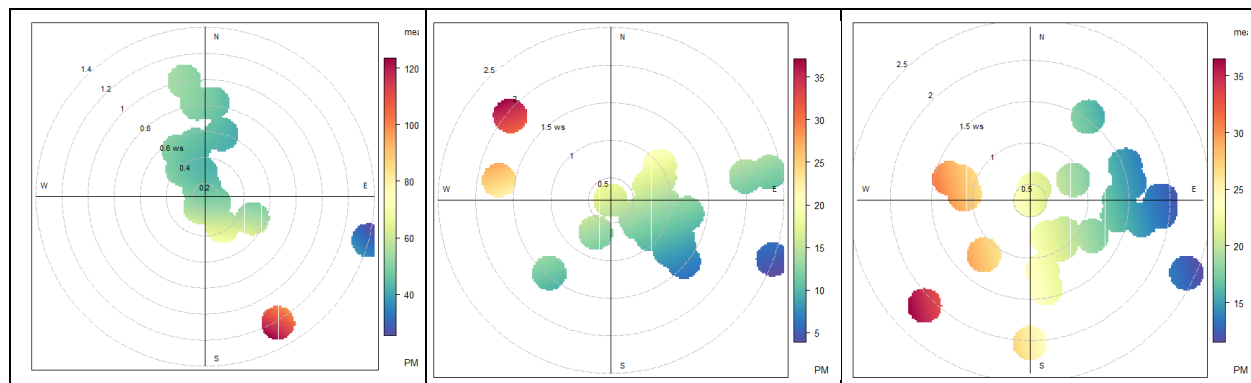


Fuente: Elaboración propia

En las gráficas de la Tabla 24, correspondientes a la estación de Kennedy, no se percibe una dirección del viento claramente definida, pero se pueden identificar dos comportamientos predominantes: El primero es una dispersión hacia el suroeste en los casos de 2013, 2016, 2017, 2018 y 2019 y el otro es una dispersión hacia el sureste en los casos de 2015-1, 2015-2 y 20153. Sin embargo, se encontró una particularidad y es que en esta estación se observan altas frecuencias y velocidades que superan los 6m/s pero en algunos casos como por ejemplo el 2016, no se presenta dispersión y la concentración de $PM_{2.5}$ se mantiene alrededor del foco de emisión con concentraciones mayores a $110\mu g/m^3$ de la misma forma que el año 2015-1 y en el 2018 con $80\mu g/m^3$, mientras que los valores menos elevados fueron 2013 y 2019 con concentraciones alrededor de $40\mu g/m^3$.

Tabla 25. Gráficas Polares para la estación Ministerio de Medio Ambiente en el periodo de 2015-1 al 2019

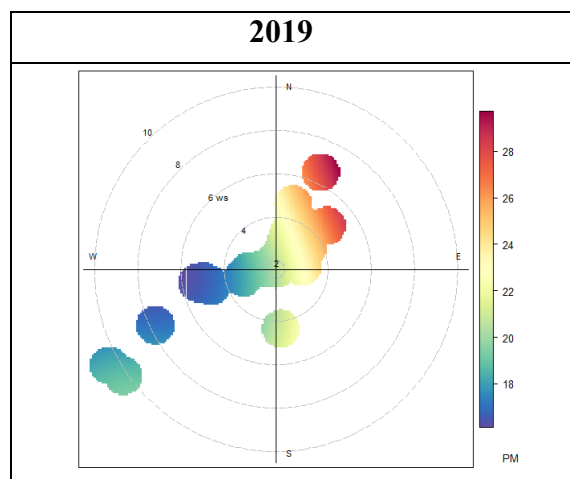




Fuente: Elaboración propia

En las estaciones del Ministerio de Medio Ambiente ubicadas en la Tabla 25, se observa una tendencia en la dirección del viento hacia el Sureste en la mayoría de los casos, excepto en el año 2016 ya que, en este, la dirección fue hacia el Norte y presentó los valores de velocidad más bajos al no superar los 1,2m/s. En estas gráficas, se evidencia que no hay una buena dispersión del contaminante $PM_{2.5}$ ya que la máxima velocidad de viento registrada fue de 3,5m/s en el 2015-2 y la concentración más alta fue de $120\mu g/m^3$, correspondiente al año 2016, con respecto a las demás gráficas y concordando con los registros de velocidad descritos anteriormente, finalmente, cabe mencionar que, al comparar las gráficas entre sí, se determinó que la concentración más baja fue de $9\mu g/m^3$ en el año 20153.

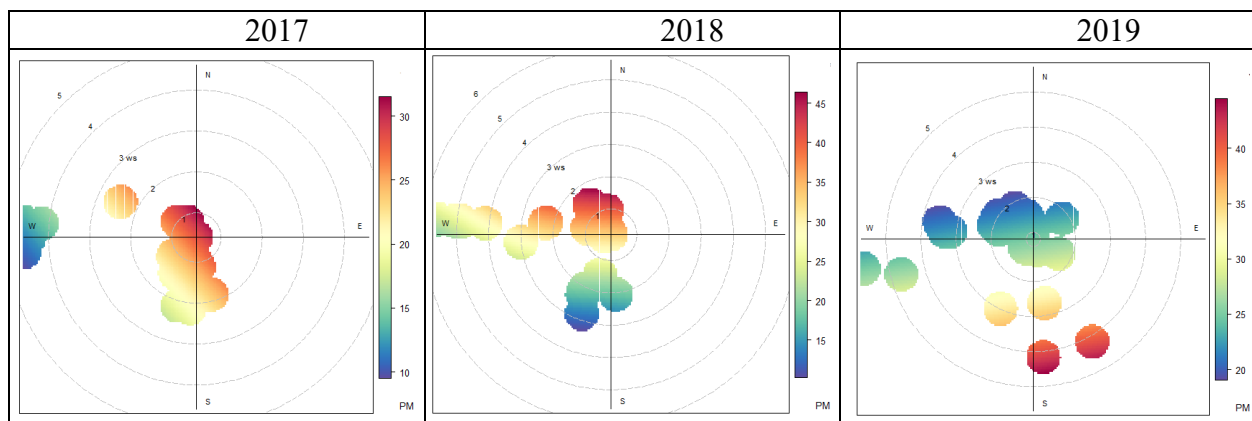
Tabla 26. Gráfica polar para la estación de Fontibón en el año 2019



Fuente: Elaboración Propia

En la gráfica de Fontibón expuesta en la Tabla 26, se percibe una velocidad del viento alta con un valor máximo de 10m/s y una dirección del viento poco definida, pero con tendencia, en primer lugar, hacia el noreste y en segundo lugar hacia el suroeste. Es posible que los registros máximos de concentración del contaminante $PM_{2.5}$ en esta estación sean bajos, con valores alrededor de los $30\mu g/m^3$ debido a las altas velocidades evidenciadas y a su vez a la buena dispersión que se presenta en la gráfica.

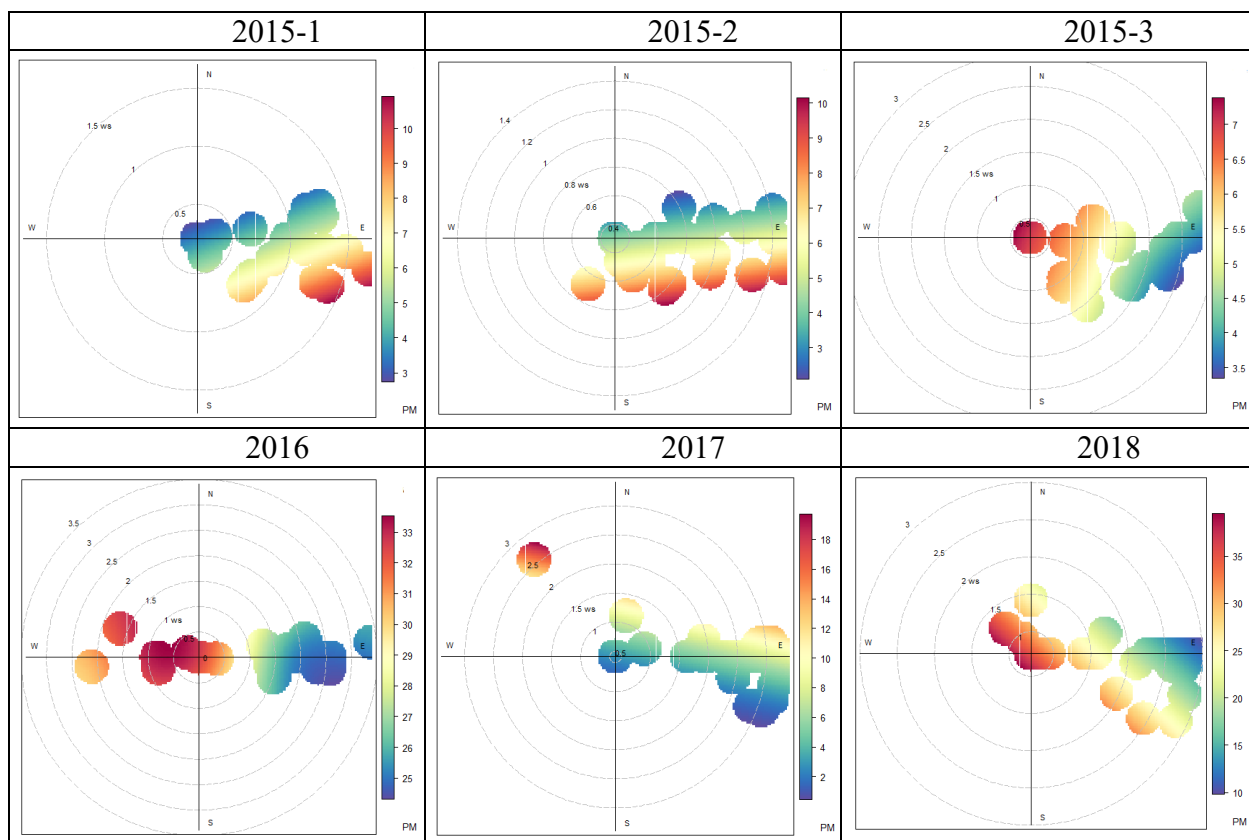
Tabla 27. Gráfica polar para la estación Puente Aranda en el periodo de 2017 al 2019



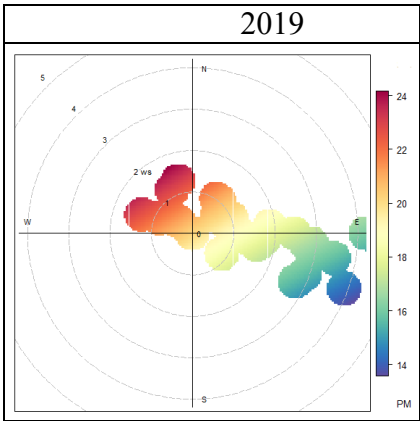
Fuente: Elaboración propia

En las gráficas de la Tabla 27, correspondientes a la estación de Puente Aranda, la dirección de vientos predominante es hacia el Oeste y el Suroeste con altos valores de velocidad que oscilan entre los 5 y 6m/s y aunque se observan vientos fuertes con elevadas velocidades, la dispersión de las concentraciones más altas del contaminante PM_{2.5} no es significativa presentando poco movimiento en estos niveles de 45µg/m³ como los encontrados en el año 2018 , situación que posiblemente pudo incrementar la exposición durante un mayor periodo de tiempo durante los años estudiados.

Tabla 28. Gráfica polar para la estación San Cristóbal en el periodo de 2015-1 al 2019



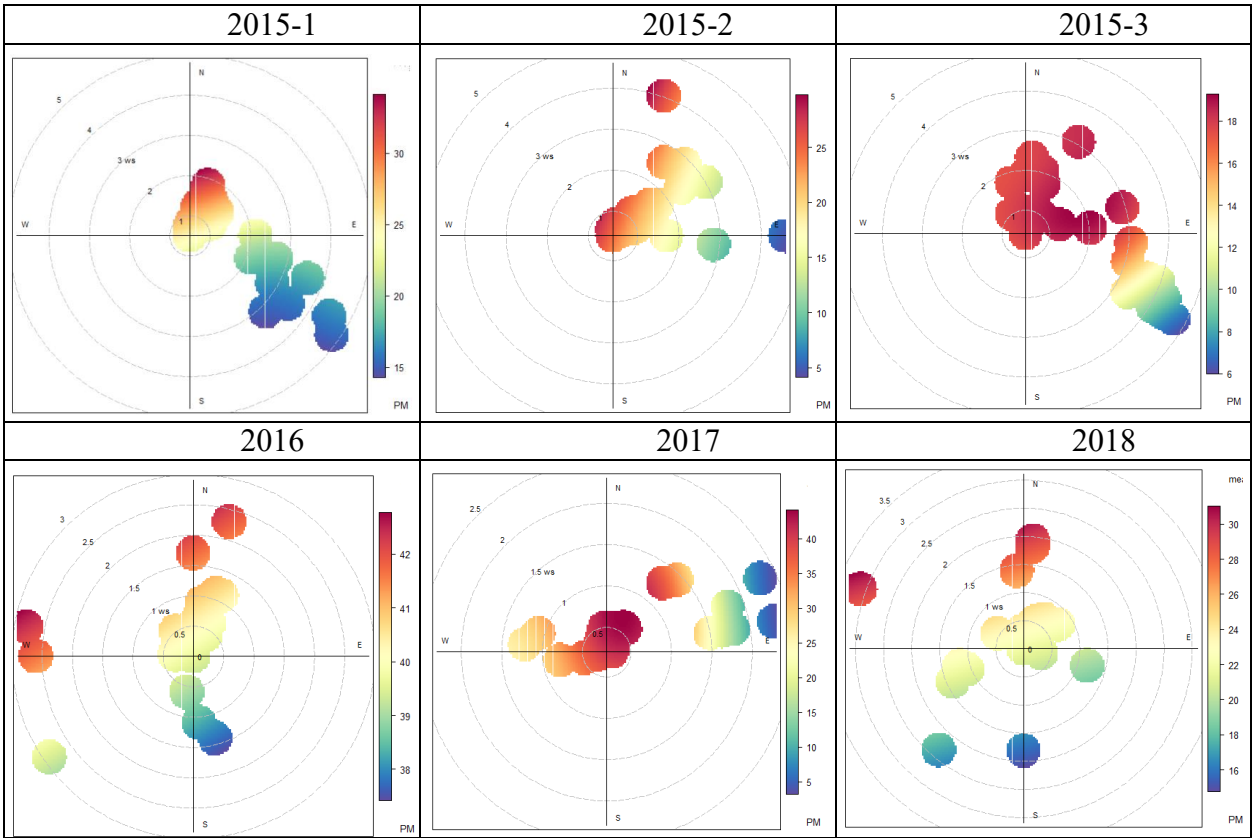
Descripción del comportamiento del contaminante criterio $PM_{2.5}$ durante las jornadas del día sin carro entre los años 2013 y 2019 en Bogotá



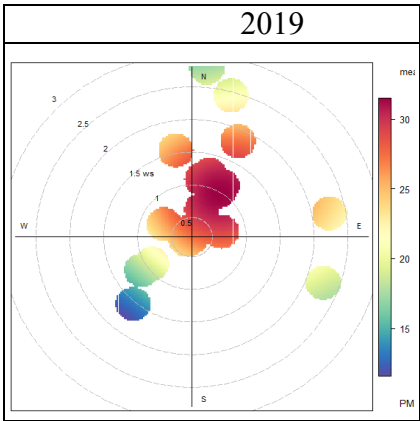
Fuente: Elaboración propia

En el caso de San Cristóbal, a partir de las gráficas de la Tabla 28, se evidencia un patrón muy claro en la dirección del viento, de Oeste a Este, presente en todos los años estudiados. No se observa una dispersión significativa del contaminante, lo cual puede ocurrir porque las velocidades del viento registradas van de 0 a 3m/s en todos los casos excepto en el 2019 donde alcanza 5m/s, debido esto, cabe mencionar que las concentraciones más altas registradas fueron de $35 \mu g / m^3$ en el 2016 y las menores concentraciones correspondieron al año 20153 con $7 \mu g / m^3$.

Tabla 29. Gráfica polar para la estación Suba en el periodo de 2015-1 al 2019



Descripción del comportamiento del contaminante criterio $PM_{2.5}$ durante las jornadas del día sin carro entre los años 2013 y 2019 en Bogotá

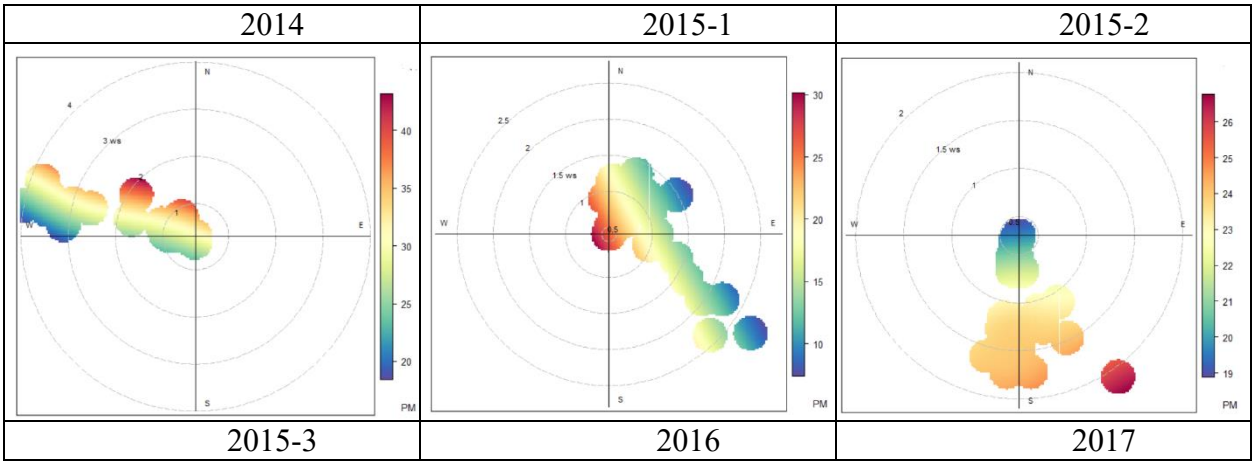


Fuente: Elaboración propia

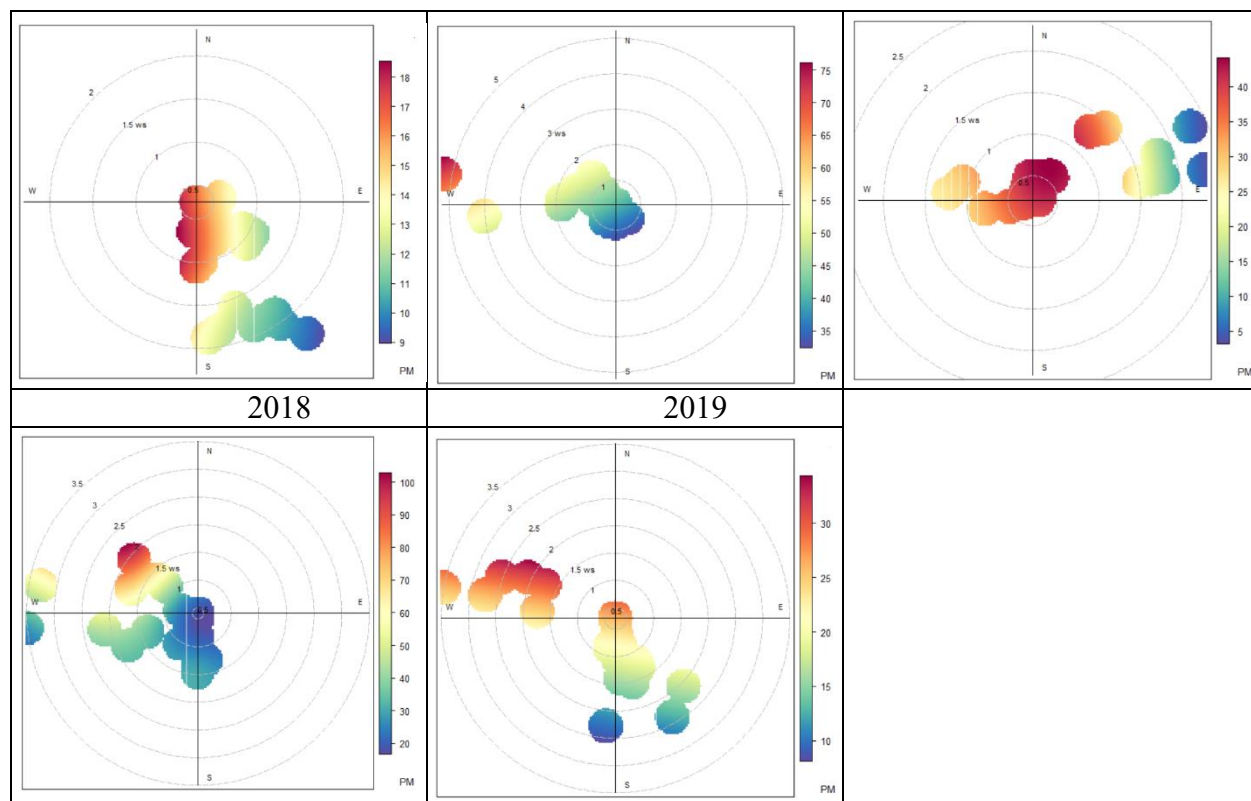
En las gráficas de la estación de Suba, ubicadas en la Tabla 2, no se observa una tendencia definida de dirección del viento para todos años, pero con base en las rosas de viento correspondientes para esta estación ubicadas en el anexo 1, se puede decir que los vientos presentados en el periodo de análisis tienen una dirección predominante desde el suroeste hacia el noreste. Por su parte, la velocidad del viento fue muy reducida con valores entre 0 y 3m/s para la mayoría de casos. Sin embargo, en todas las jornadas del día sin carro del año 2015 se alcanza una velocidad del viento de 4 a $5\mu g/m^3$ lo cual indica un posible favorecimiento de la dispersión en esta zona como se percibe en las gráficas.

Asimismo, la concentración del contaminante $PM_{2.5}$ tuvo una buena dispersión por lo descrito anteriormente y se mantiene alrededor de los focos de emisión con valores de $43\mu g/m^3$, en el 2016 e incluso logra alcanzar valores más bajos como en el 2015-3 con $20\mu g/m^3$.

Tabla 30. Gráfica polar para la estación Tunal en el periodo de 2014 al 2019



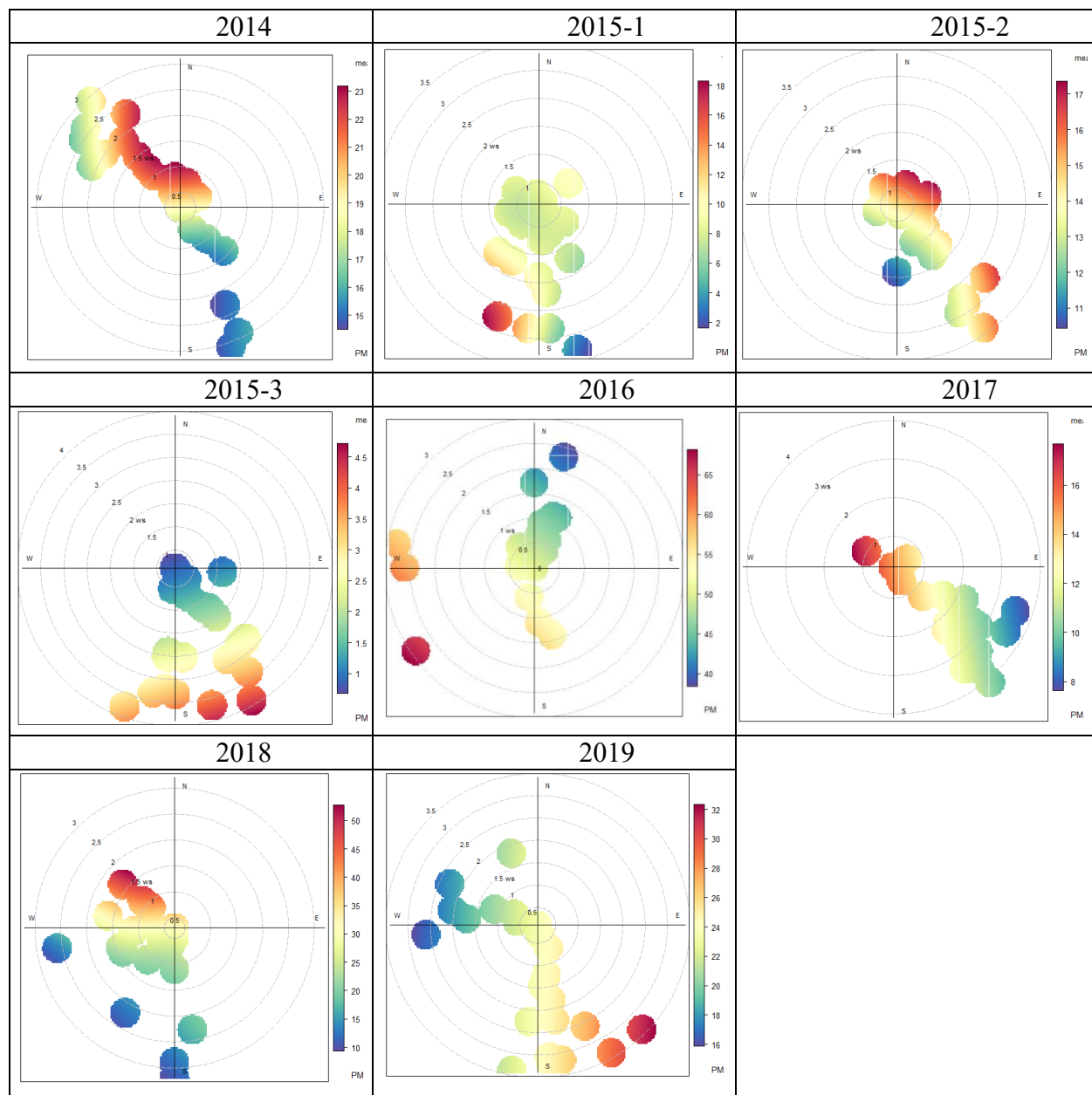
Descripción del comportamiento del contaminante criterio $PM_{2.5}$ durante las jornadas del día sin carro entre los años 2013 y 2019 en Bogotá



Fuente: Elaboración propia

En las gráficas de la estación Tunal, ubicadas en la tabla 30, tampoco se observa una dirección del viento definida, pero sí se puede ver una tendencia hacia el Sur y Sureste en la mayoría de las gráficas. También, se evidencia que la velocidad del viento fue muy reducida con valores entre 0 y 3,5m/s para la mayoría de los casos. No obstante, en los años 2014 y 2016 se alcanza una velocidad de $4\mu\text{g/s}$ y $5\mu\text{g/m}^3$ respectivamente lo cual favorece la dispersión. En cuanto a esta variable, se puede decir que, aunque se perciben valores bajos como en el 2015-3 con $18\mu\text{g/m}^3$, hay registros de concentraciones máximas de $75\mu\text{g/m}^3$ como se observa en el año 2016 y en muchos de los casos no se ve un movimiento representativo del contaminante independientemente de la concentración de $PM_{2.5}$ que tenga como es el caso del año 2017, o que indicaría un posible aumento del riesgo de exposición en el área.

Tabla 31. Gráfica polar para la estación Usaquéen en el periodo de 2014 al 2019



Fuente: Elaboración propia

Para la estación de Usaquéen, (ver Tabla 31), en general, la tendencia de la dirección del viento es hacia toda la zona sur. Las velocidades no son representativas debido a que en todos los casos van de $3\mu\text{g}/\text{m}^3$ a $4\mu\text{g}/\text{m}^3$ por lo cual se evidencia una baja dispersión en la mayoría de los casos.

Es importante mencionar que se registran concentraciones significativas de PM_{2.5} como es el caso del año 2018 con valores de $100\mu\text{g}/\text{m}^3$ y el 2016 con $75\mu\text{g}/\text{m}^3$ mientras que los valores mínimos fueron de 26 y $28\mu\text{g}/\text{m}^3$ correspondientes a los registros de 2015-2 y 2015-3 respectivamente.

Análisis de graficas polares: Con base en las gráficas polares, se pudo observar que en algunas estaciones las concentraciones de PM_{2.5} por parcela de viento son altas a causa de sus características

de dispersión las cuales fueron: Carvajal, Kennedy, Tunal y Puente Aranda y por ello son las estaciones seleccionadas para evaluar el nivel de exposición de la población en las jornadas del día sin carro durante los años 2013 al 2019.

Por otra parte, cabe mencionar que dentro de todas las tendencias hubo un día sobresaliente por sus buenas condiciones de dispersión y en su mayoría bajos niveles de concentración y corresponde al 2015-3 realizado el 22 de septiembre de 2015, los registros de PM_{2.5} para este periodo, no son altos en la mayoría de las estaciones, lo cual ocurre posiblemente porque, en primer lugar, aún existe la presencia de algunas corrientes de viento fuertes que quedan como remanentes del paso de los vientos alisios en este periodo del año (Ochoa, 2011) y en segundo lugar, porque según la investigación de Mamta & Bassin (2011), durante este mes el régimen de lluvias se incrementa al punto de generar un lavado de partículas transportadas por el aire categorizándolo como uno de los periodos del año en que el aire está más limpio, no obstante, si se seleccionara esta fecha para realizar las jornadas del día sin carro habría un posible descenso en la línea de participación de bici usuarios y se incrementaría la posibilidad de tráfico y dificultades en la logística del transporte público de la ciudad a causa de las fuertes lluvias características de este mes.

En relación con lo anterior, es pertinente resaltar que según el estudio de Ortiz (2016), el comportamiento de los vientos en Bogotá, se divide en 4 zonas: La zona 1, que está conformada por las áreas de Guaymaral y Suba, presenta una tendencia de vientos hacia el sur y suroeste de la ciudad, la zona 2, conformada por Usaquén, los alrededores de la estación Ministerio de Medio Ambiente y San Cristóbal, tienen un comportamiento hacia el Sur y Sureste, la zona 3, comprende los alrededores de las estaciones de Kennedy, Carvajal y Tunal con vientos en dirección Sur y la zona 4 abarca la zona central de la ciudad pero los vientos allí no tienen patrón definido. Los resultados para las gráficas de polares obtenidas en el proyecto que se presenta en este documento reafirman las tendencias encontradas por Duran (2016), ya que en su mayoría coinciden con los resultados del estudio.

Adicionalmente, se debe mencionar un factor que puede afectar tanto las cargas del PM_{2.5} como la dispersión del mismo y es la ocurrencia de incendios en Bogotá los cuales son favorecidos por factores como el fenómeno del niño, las condiciones de reducidas precipitaciones y baja humedad relativa y a causa de esto se han venido registrando y monitoreando la aparición de incendios en el distrito capital como se puede observar en la recopilación de estos datos históricos para los años 2009 y 2010 en el que los meses de mayor ocurrencia fueron Enero y Febrero (Becerra, 2011). Asimismo, en otra investigación en la que se elaboró un mapa de incendios forestales para el suelo rural de Bogotá, para el año 2014, se encontró que el primer trimestre del año fue donde más se registraron eventos de incendios forestales (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2014). Resultados similares se ven evidenciados en el Boletín de predicción climática del IDEAM los cuales indican que los meses de Enero y Febrero son los que presentan una de las probabilidades más altas en ocurrencia de incendios debido a que este periodo coincide con la temporada de menos lluvias en la Región Andina, incrementando las posibilidades de ocurrencia de incendios forestales (IDIGER, 2017) y, finalmente, se establecieron las principales causas encontrando como predominante la deforestación para actividades agrícolas y pecuarias, los residuos de vidrios, latas y podas entre otras actividades en las que el fuego es utilizado para eliminar cobertura vegetal (IDIGER, 2019).

8.1.3. Cálculos de altura de capa de mezcla y categorización de la estabilidad atmosférica

En esta sección se realizaron los cálculos de altura de capa de mezcla y la categorización de la estabilidad atmosférica como se explicó previamente en el apartado de metodología, su importancia reside en que la altura de capa de mezcla determina el volumen de aire en la atmósfera para diluir los contaminantes, o, en otras palabras, es el espesor de la atmósfera en la cual se moviliza para este caso el PM_{2.5}. En cuanto a la estabilidad atmosférica, esta determina el movimiento de las masas de aire a partir del viento y la radiación solar, influyendo junto con la altura de capa de mezcla en la dispersión del contaminante. En términos generales se obtuvo la altura de capa de mezcla en metros y que tan estable era la condición de la atmósfera, hora a hora, durante la totalidad de los días donde se realizaron las jornadas del día sin carro, a partir de estos datos se realizaron las gráficas del siguiente objetivo.

Por lo tanto, el desarrollo del procedimiento mencionado se puede ver a detalle en las hojas de Excel adicionadas, para ello, es necesario hacer doble click sobre una celda en la hoja de cálculo, ampliar y observar cada una de las hojas que allí se encuentran. Cabe aclarar, que la información se presentó de esta manera debido a que el documento de Excel es bastante amplio, no se logró adjuntar a manera de anexo y debido a la extensión de los cálculos, tampoco fue posible transcribirlos.

8.1.3.1. Cálculos para Altura de capa de mezcla:

Donde Altura de capa de mezcla es ADM y Radiación Solar es RS

Días sin carro				
K	M	I	UT	
Año	Mes	Día	Hora	Constante
2013	2	7	1	1721013,5
2013	2	7	2	1721013,5
2013	2	7	3	1721013,5
2013	2	7	4	1721013,5
2013	2	7	5	1721013,5
2013	2	7	6	1721013,5

*Nota: Para ver en mayor detalle los cálculos, es necesario hacer doble click sobre una celda en la hoja de cálculo, ampliar y observar cada una de las hojas que allí se encuentran.

En caso de que el lector desee ver los cálculos de manera más amplia, puede acceder al siguiente link:

<https://drive.google.com/file/d/13SpXGlrDpKyMBBxHnrONsrhKOpe-QbnY/view?usp=sharing>

8.1.3.2. Determinación de Estabilidad atmosférica

FECHA	ESTACION	Hora Local (TL)
2/07/2013	Centro de alto rendimiento	1
2/07/2013	Centro de alto rendimiento	2
2/07/2013	Centro de alto rendimiento	3
2/07/2013	Centro de alto rendimiento	4
2/07/2013	Centro de alto rendimiento	5
2/07/2013	Centro de alto rendimiento	6
2/07/2013	Centro de alto rendimiento	7
2/07/2013	Centro de alto rendimiento	8
2/07/2013	Centro de alto rendimiento	9

*Nota: Para ver en mayor detalle los cálculos, es necesario hacer doble click sobre una celda en la hoja de cálculo, ampliar y observar cada una de las hojas que allí se encuentran.

En caso de que el lector desee ver los cálculos de manera más amplia, puede acceder al siguiente link:

https://drive.google.com/file/d/1Ay7IJPVr9r4pf4Mv_yb13ylBYCclzxTL/view?usp=sharing

8.2. Resultados y análisis del segundo objetivo

En esta sección, se presentará en primera instancia las gráficas de la altura de capa de mezcla y estabilidad atmosférica con sus respectivos análisis. Posteriormente, se analizará la dispersión del contaminante PM_{2.5} en cuatro estaciones que dieron críticas en términos de contaminación, Carvajal, Kennedy, Puente Aranda y Tunal, teniendo en cuenta la relaciones entre variables que influyen en estos eventos. Por último, se analizará la exposición de bici-usuarios y peatones de la localidad de Kennedy.

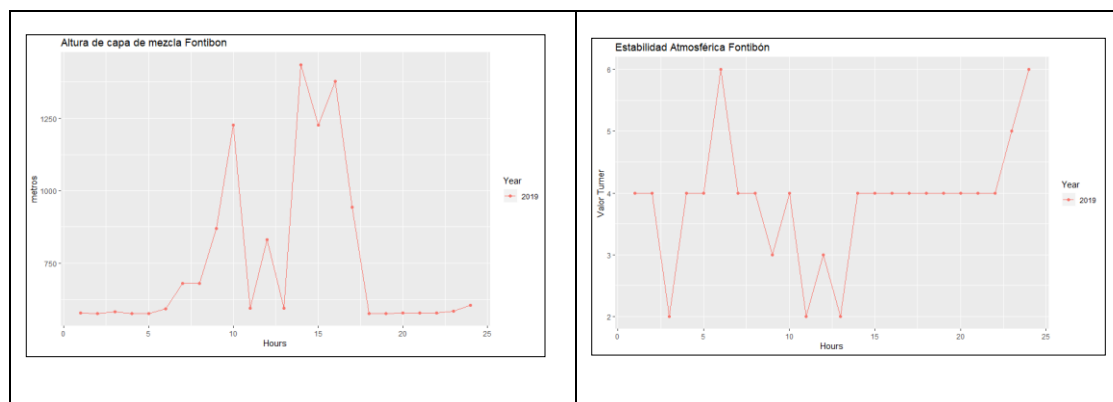
8.2.1. Graficas Altura de capa de mezcla y Estabilidad Atmosférica

A continuación, se mostrarán una serie de gráficas de altura de capa de mezcla y estabilidad atmosférica de cada estación para cada jornada del día sin carro desde el año 2013 al 2019 con el fin de obtener más elementos para evaluar la dispersión del contaminante PM_{2.5}. Se debe tener en cuenta que cada año graficado presenta colores diferentes para indicar los niveles de PM_{2.5} en la jornada del día sin carro y no se debe generalizar la coloración de las líneas entre gráficas, por ello se recomienda revisar las convenciones de cada una.

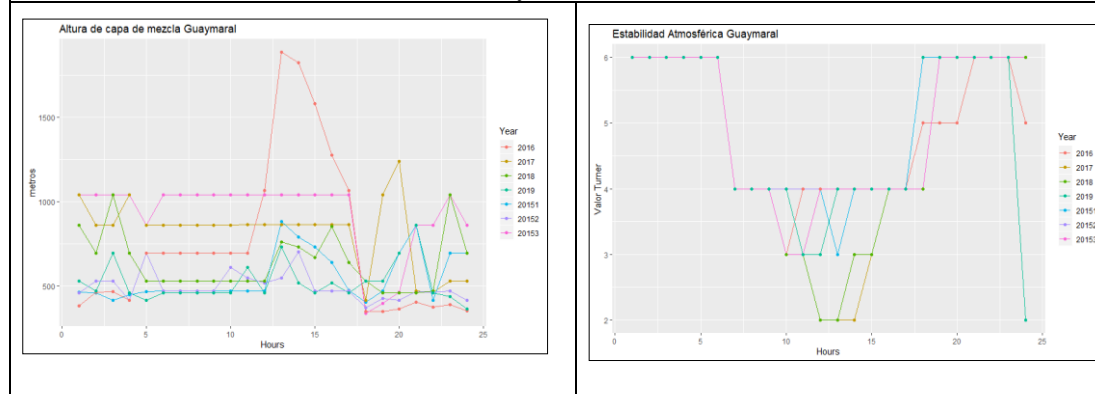
Tabla 32. *Altura de capa de mezcla y estabilidad atmosférica de las estaciones de monitoreo de calidad del aire durante las jornadas del día sin carro del año 2013 al 2019*

Altura de capa de mezcla y estabilidad Atmosférica para la estación de calidad del aire Carvajal	
Altura de capa de mezcla y estabilidad Atmosférica para la estación de calidad del aire Centro De Alto Rendimiento	
Altura de capa de mezcla y estabilidad Atmosférica para la estación de calidad del aire Ferias	
Altura de capa de mezcla y estabilidad Atmosférica para la estación de calidad del aire Fontibón	

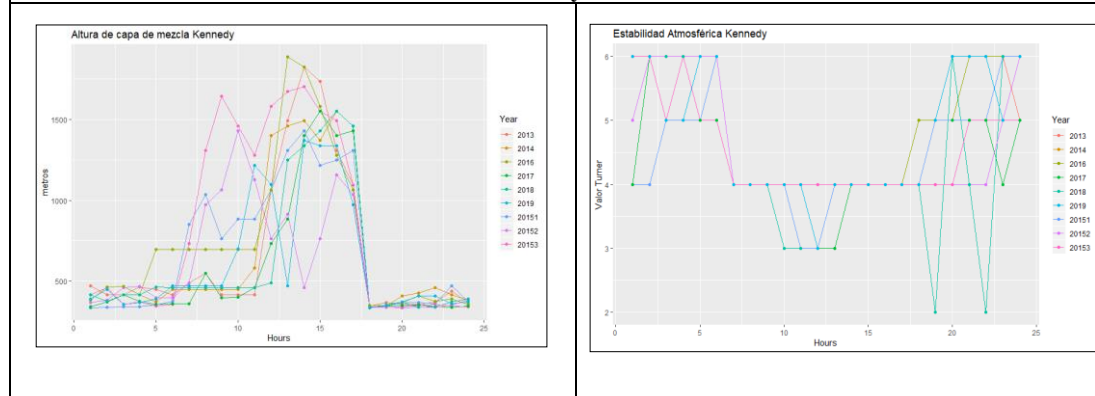
Descripción del comportamiento del contaminante criterio PM_{2.5} durante las jornadas del día sin carro entre los años 2013 y 2019 en Bogotá



Altura de capa de mezcla y estabilidad Atmosférica para la estación de calidad del aire Guaymaral

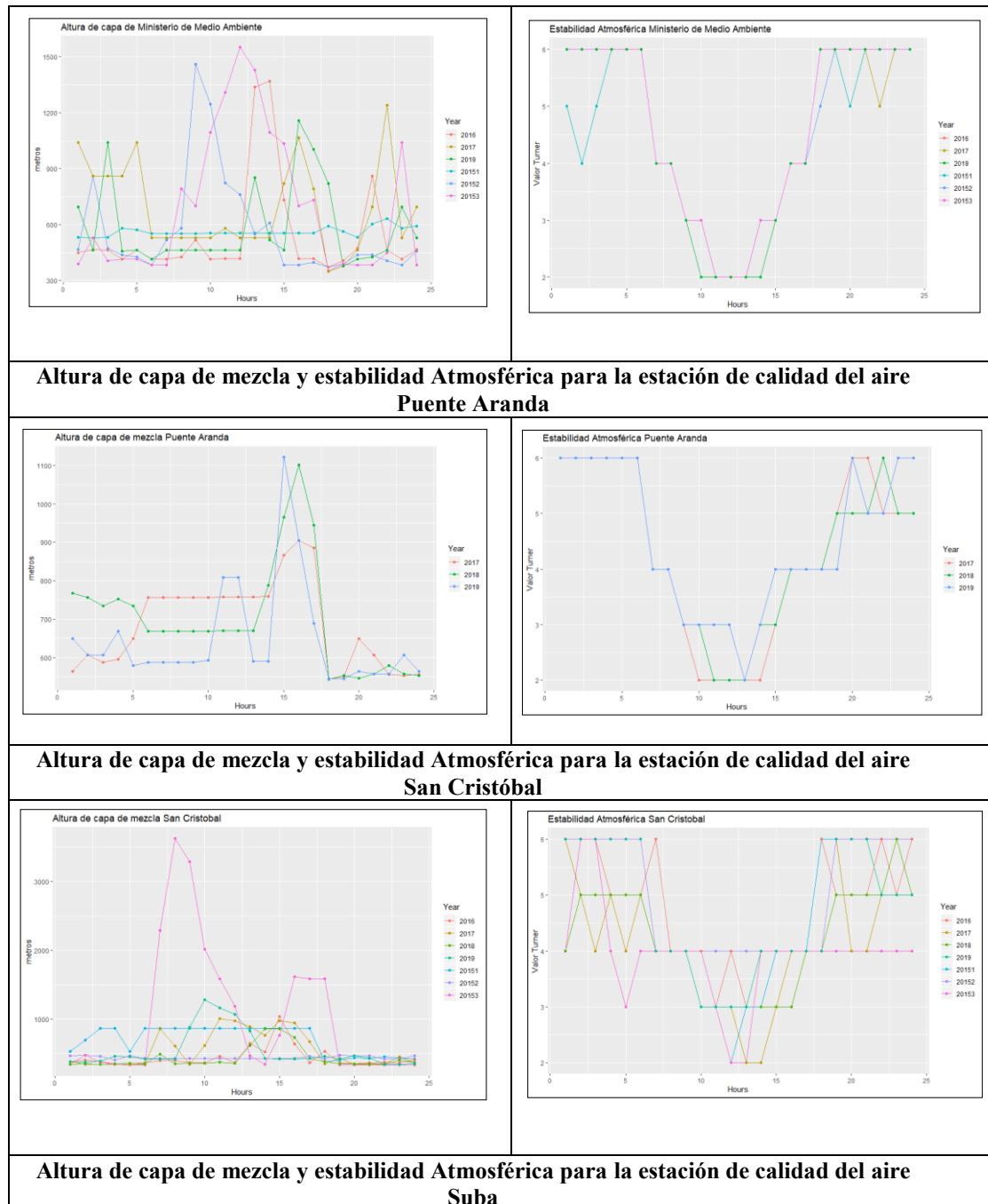


Altura de capa de mezcla y estabilidad Atmosférica para la estación de calidad del aire Kennedy

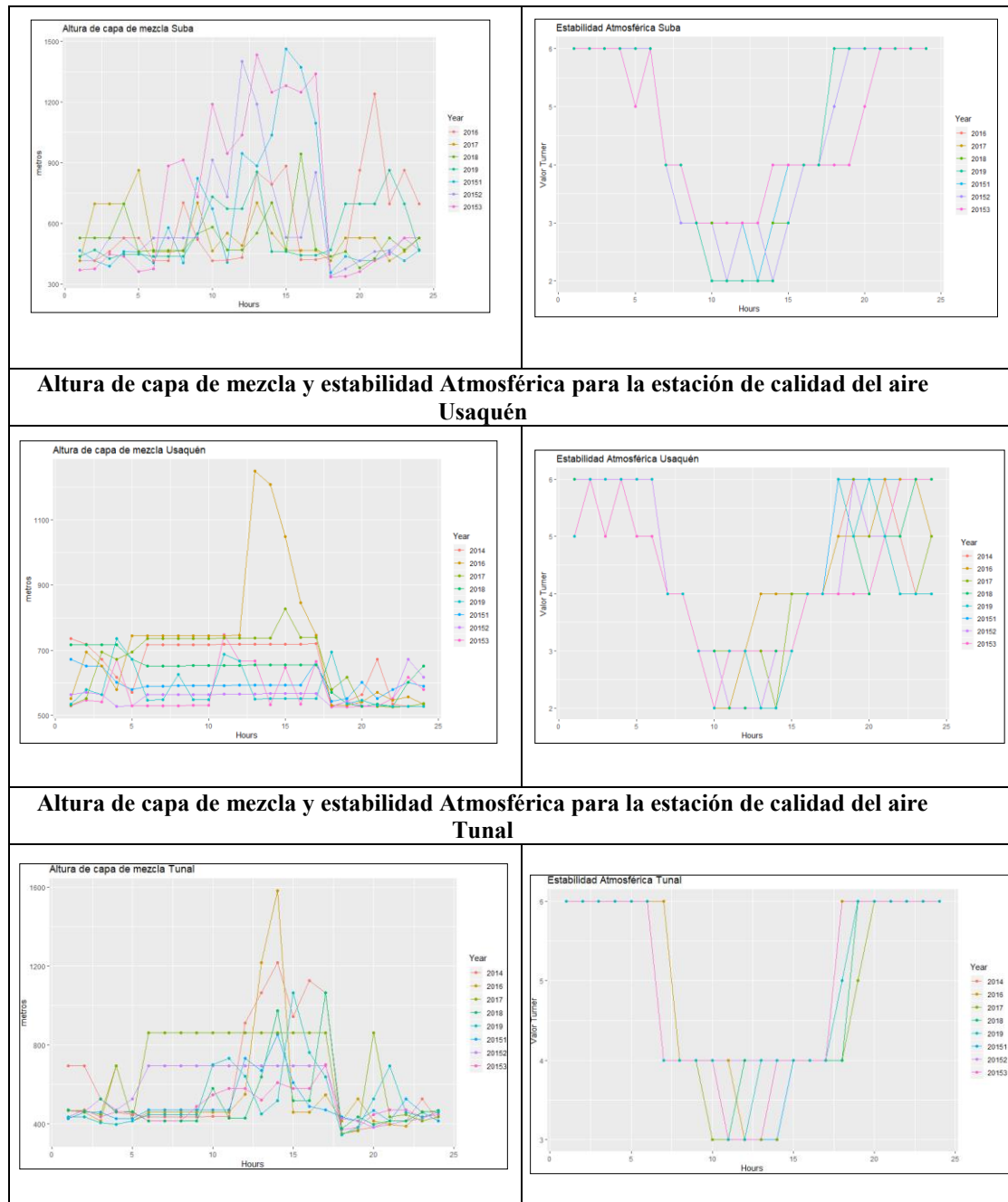


Altura de capa de mezcla y estabilidad Atmosférica para la estación de calidad del aire Ministerio de Medio Ambiente

Descripción del comportamiento del contaminante criterio PM_{2.5} durante las jornadas del día sin carro entre los años 2013 y 2019 en Bogotá



Descripción del comportamiento del contaminante criterio PM_{2.5} durante las jornadas del día sin carro entre los años 2013 y 2019 en Bogotá



Fuente: Elaboración propia

En las estaciones de monitoreo de monitoreo de calidad del aire se puede observar una tendencia en la altura de capa de mezcla y en la estabilidad atmosférica para determinadas horas del día estudiado evidenciadas en la tabla 32. En primer lugar, se logró observar que en promedio, las gráficas presentan un incremento de la altura de capa de mezcla de 11 a 4 de la tarde y en este periodo de tiempo la estabilidad atmosférica en general fue moderadamente inestable lo cual indica que las características meteorológicas en estas horas favorecen la dispersión de contaminantes, como es el caso de la estación de Kennedy y Fontibón, donde la altura de capa de mezcla alcanzó valores

representativos de 1500 m y 1400 m respectivamente puesto que en concordancia con Vicuña (2017) la altura máxima de la capa de mezcla es del orden de 1000 m y puede incrementarse hasta doblar o triplicar su valor dependiendo de la inestabilidad atmosférica que se puede presentar a causa de factores como el viento y los altos niveles de radiación solar como consecuencia de la poca cobertura nubosa (Cogliati, 2010).

Por otra parte, se evidencia en la tabla 32 que entre las 0 y las 10 horas de la mañana y entre las 5 y las 24 horas, en promedio, la altura de capa de mezcla tiende a mantenerse constante o manifiesta valores representativamente bajos en comparación a los máximos datos registrados dependiendo de cada estación como es el caso de Guaymaral, Kennedy y San Cristóbal que durante las horas anteriormente mencionadas se observaron valores mínimos de aproximadamente 300 m en la altura de capa de mezcla, lo cual es similar a los resultados obtenidos por Cogliati (2010) quien estudio la calidad del aire en áreas de asentamientos urbanos y obtuvo que el mínimo de altura de capa de mezcla es de 250 m, de lo que se deduce que alturas tan reducidas favorecen el confinamiento de los contaminantes emitidos en las capas bajas como ocurre en los núcleos urbanos e industriales. Además, estudios como el de Núñez (2011) citado por Vicuña (2017), señalan una relación directa entre la altura de capa de mezcla y la contaminación atmosférica, lo que también explica el estudio de Baena, Jiménez, Zapata, y Ramírez (2019) al demostrar que el volumen de aire utilizable para dispersar todos los elementos de la atmósfera como los gases contaminantes y el vapor de agua expulsado hacia la superficie depende de cierto nivel de turbulencia en las masas de aire y una altura que permita el movimiento entre ellas.

Asimismo, se logró verificar que la estabilidad atmosférica concuerda con el comportamiento de la altura de capa de mezcla para estas horas, puesto que cambia de moderadamente estable a neutral de las 0 a las 10 de la mañana y pasa de neutral a moderadamente estable de las 5 a las 24 horas lo que puede implicar que el contaminante se concentre cerca de la superficie debido a que durante las horas de la noche y en las primeras horas del día es regular que la atmósfera adopte un comportamiento estable especialmente por diferencias de temperatura facilitando la resistencia al movimiento vertical de los contaminantes, causando que estos regresen a su posición inicial (Vicuña, 2017).

Del mismo modo, cabe señalar que las condiciones de neutralidad ocurren por la disminución del aporte energético del sol y esto conlleva a la reducción rápida del espesor de la capa de mezcla, dando lugar a lo que se conoce como capa límite residual, conformada por la actividad remanente de la última capa de mezcla que se formó antes de la caída total del sol. Este fenómeno causa una inmovilización de los contaminantes emitidos en horas anteriores y hace que persistan en la capa límite residual incluso hasta el día siguiente, a esto se le suma la existencia de contaminantes de días anteriores en las capas más altas los cuales generan un incremento de los niveles de contaminación a los que están expuestos los ciudadanos (Vicuña, 2017). Esto se demuestra en el estudio de Baena (2019) donde, según su evaluación, la concentración de material particulado permanece en la atmósfera durante tres días en ciertas zonas del valle de Aburrá y con base en esto, se induce que probablemente existe una carga de contaminación mayor a la que se espera durante la jornada del día sin carro y la calidad del aire durante esta jornada puede verse afectada por la concentración residual de contaminación generada en fechas anteriores.

Por otra parte, es importante resaltar que en todas estaciones en cierta medida evidenciaron inversiones térmicas en diferentes momentos del día, donde, las más notorias fueron en las estaciones de Ferias, Kennedy, Centro de Alto rendimiento, Ministerio de Medio Ambiente y Suba, las cuales se suelen presentar antes de las 3 de la tarde, puesto que, particularmente en las horas de la mañana hay un incremento de la temperatura de la superficie del suelo y el aire que se encuentra cerca de ella comienza a calentarse generando que la capa fría que se encuentra en la parte superior baje por diferencia de densidades. Después de las 3 de la tarde la radiación neta comienza a descender, provocando que se detenga el intercambio frecuente de aire con diferentes temperaturas. Según lo observado en las gráficas de altura de capa de mezcla en la tabla 32 y dependiendo de las condiciones en que se encontraba el área de cada una de las estaciones se pudieron manifestar alguno de los tipos de inversión térmica descritos en el marco teórico (Figuerola y otros, 2013). Sin embargo, cabe aclarar que los comportamientos observados en las gráficas también pueden deberse a que las condiciones de temperatura en ese momento no fueron favorables.

Se considera pertinente hacer énfasis en la altura de capa de mezcla de la estación de Kennedy, por ser una de las estaciones que se va a tomar de enfoque en el presente proyecto. En este caso, se logra observar a modo de ejemplo en el año 2015-3 a las 9 de la mañana, un posible fenómeno de inversión térmica, al identificar que la altura de capa de mezcla presentaba un valor de 1500 m y en un periodo menor a dos horas se redujo a 1250 m con lo que se observa un cambio rápido en la altura de capa de mezcla y exactamente en ese momento, la estabilidad atmosférica tendió a ser neutral, cumpliendo no solo con las características de la inversión térmica, sino que también corrobora los altos niveles del contaminante $PM_{2.5}$ obtenidos en esta estación. Este fenómeno tiene relevancia porque es una condición que se repite en diferentes periodos del año, sin embargo, al depender de las condiciones meteorológicas típicas de la zona su ocurrencia no presenta una relación aparente que permita su predicción.

En cuanto a las horas de la tarde y noche se puede decir que según las condiciones encontradas en las gráficas de la tabla 32, se presentan concentraciones de $PM_{2.5}$ durante este horario de manera similar que en el estudio de Gramsch y otros, (2014) donde se muestran inversiones frecuentes en la superficie urbana durante la noche y las primeras horas de la mañana, restringiendo en mayor medida el flujo de aire vertical y evidenciando mayores niveles de material particulado, que en algunas ocasiones se puede observar como una capa oscura de smog causada por la presencia de óxidos de nitrógeno y partículas suspendidas (García, y otros, 2012).

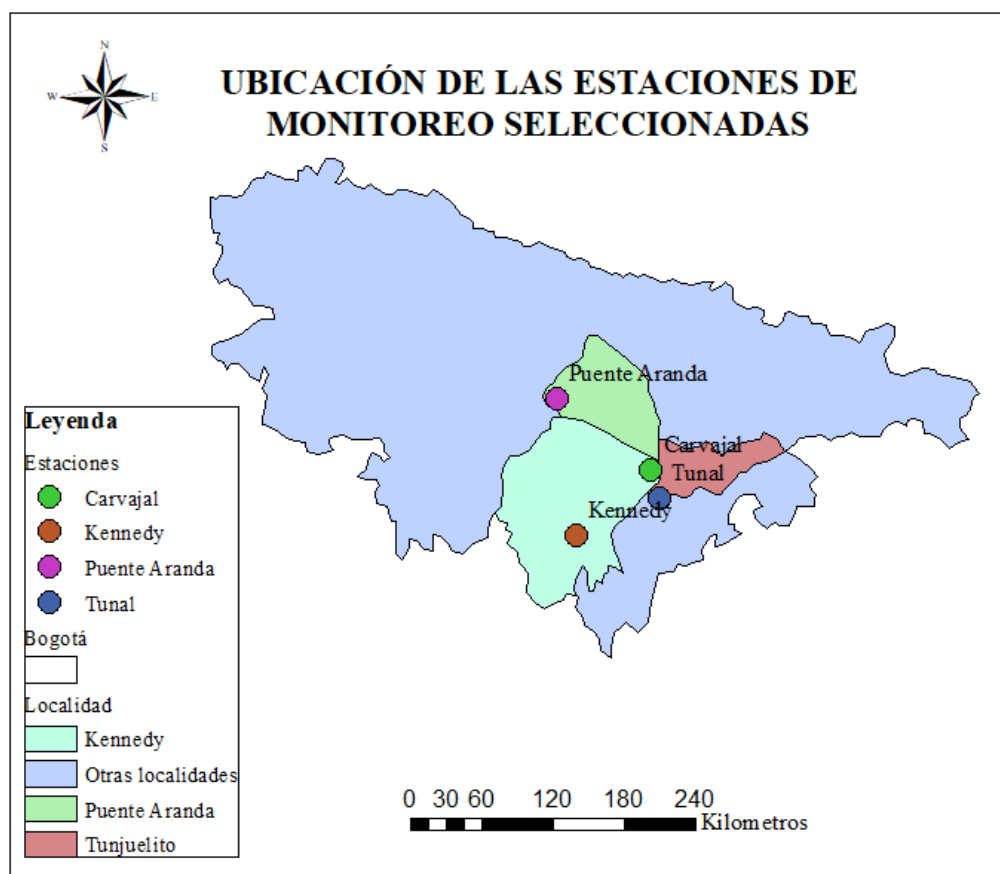
8.2.2. Análisis de dispersión del contaminante $PM_{2.5}$ en las estaciones de calidad del aire Carvajal, Kennedy, Puente Aranda y Tunal

A partir de los resultados obtenidos anteriormente y de sus respectivos análisis, se determinó que las estaciones que presentaron condiciones de contaminación más altas por factores de dispersión y los niveles medidos de $PM_{2.5}$ fueron Carvajal, Kennedy, Puente Aranda y Tunal. Por lo tanto, las gráficas de polares correspondientes a las estaciones mencionadas del año 2018 y 2019 se superpusieron sobre un mapa base de la zona de monitoreo, con el fin de identificar con más facilidad los posibles focos de emisión y hacia qué lugares se dirige.

Asimismo, se hizo énfasis en las vías principales y algunas secundarias que se encontraron alrededor del punto de medición, puesto que, una presencia significativa y constante de vehículos, marca una diferencia en las condiciones de emisión y de la misma forma de exposición de la población estudiada más adelante. Esto se debe a que además de los resultados obtenidos con las gráficas de puntos y líneas para el primer objetivo donde se pudieron observar registros muy elevados de PM_{2.5}, en la investigación de Venkateswara y Prasad. (2010), mencionada en el estado del arte, se evidencia que, al interior de un motor, la combustión ideal o terminada de los combustibles para motores compuestos exclusivamente por carbono e hidrógeno solo generaría CO₂ y H₂O, a la exclusión de cualquier otro producto perjudicial para la salud. No obstante, el reducido tiempo con el que cuentan los elementos químicos en el momento de la integración de procesos de oxidación en las cámaras de combustión, la falta de homogeneidad en las mezclas carburadas y las diferencias y variaciones rápidas en la temperatura, generan dificultades al momento de alcanzar un estado ideal de equilibrio termodinámico (Venkateswara y Prasad, 2010). Por lo tanto, la combustión incompleta de un hidrocarburo termina en la formación de una amplia gama de compuestos orgánicos e inorgánicos distribuidos en gases, elementos semivolátiles y material particulado.

Por lo tanto, con el fin de hacer una contextualización del área de estudio, se realizó el mapa de las localidades y las estaciones de monitoreo de calidad del aire seleccionadas para analizar que se puede observar en la figura 11.

Figura 10. Mapa de las estaciones de monitoreo de calidad del aire Carvajal, Kennedy, Puente Aranda y Tunal

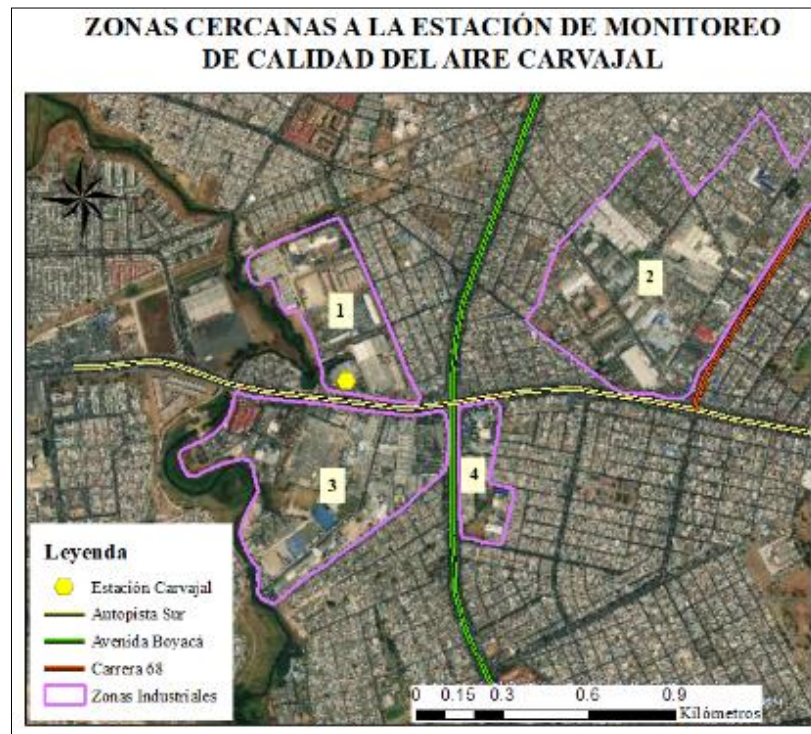


Fuente: Elaboración propia

Como se observó en la figura 11 se van a analizar cuatro estaciones, las cuales se presentarán a continuación

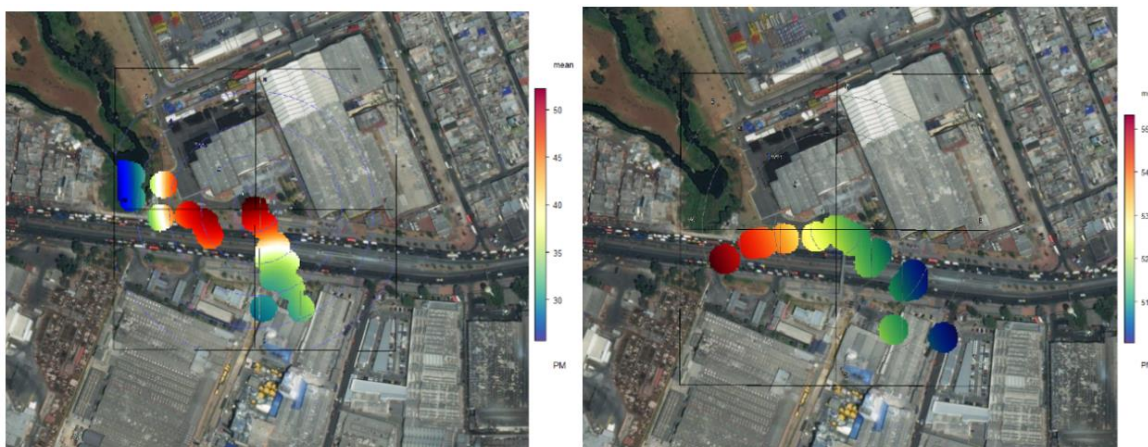
Análisis de dispersión del $PM_{2.5}$ en la estación de monitoreo de calidad del aire Carvajal

Figura 11. Mapa de las zonas cercanas a la estación de monitoreo de calidad del aire Carvajal



Fuente: Elaboración propia con referentes del mapa UPZ Carvajal, usos predominantes del año 2012. Alcaldía Mayor de Bogotá. (2013, p35).

Figura 12. Sobreposición de las gráficas polares de la estación de calidad del aire Carvajal para los años 2018 y 2019



Fuente: Elaboración propia

En la figura 11, se puede observar las zonas cercanas a la estación de monitoreo, con el fin de identificar las posibles actividades que pudieron influenciar en la emisión de $PM_{2.5}$. Esta estación se encuentra ubicada en la localidad de Kennedy como se puede corroborar en la tabla 1, específicamente en la UPZ 45 denominada Carvajal y se clasifica como una estación industrial y de tráfico. La primera se caracteriza por medir contaminantes influenciados por emisiones de fuentes industriales y la segunda por medir contaminantes que provengan de vías principales donde se presentan congestiones vehiculares (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2007).

Teniendo en cuenta los resultados descritos para la tabla 20 y según la coloración roja oscura en las imágenes anteriores, se puede decir que los focos de emisión del contaminante $PM_{2.5}$ en primera instancia son posiblemente la zona de producción número 1 debido a su cercanía con la estación de monitoreo de calidad del aire. Igualmente, y de acuerdo con la figura 11 se observan en color violeta claro las zonas industriales distribuidas por la UPZ que corresponden en cierta parte a plantas de aceites y grasa por la parte Suroeste y al oriente de la Avenida Boyacá tintorerías que funcionan con carbón las cuales producen una emisión continua de contaminantes que no se dispersan tan fácilmente, a pesar de que se presentan vientos con velocidades aproximadas de 4 a 5 m/s los cuales son relativamente altos. Sumado a lo anterior, se encuentran la avenida Boyacá, la cual se ubica al costado Este del punto de medición, coincidiendo con una de las áreas desde la cual probablemente proviene el contaminante $PM_{2.5}$ hacia el suroeste. De la misma forma ocurre con la autopista Sur, que, aunque se encuentre en el costado sur del punto de medición puede ser un foco de contaminación ya que las emisiones provocadas por el tráfico vehicular también se dirigen hacia el suroeste, situación que puede incidir significativamente en el nivel de exposición al contaminante $PM_{2.5}$ porque pese a que Carvajal se caracteriza por ser un área residencial, cuenta con numerosas pequeñas industrias, algunas de ellas en proceso de expansión que a su vez generan un constante flujo de camiones de carga necesarios para el desarrollo de estas compañías como lo menciona el estudio de Vargas y Rojas (2010) citado en la justificación.

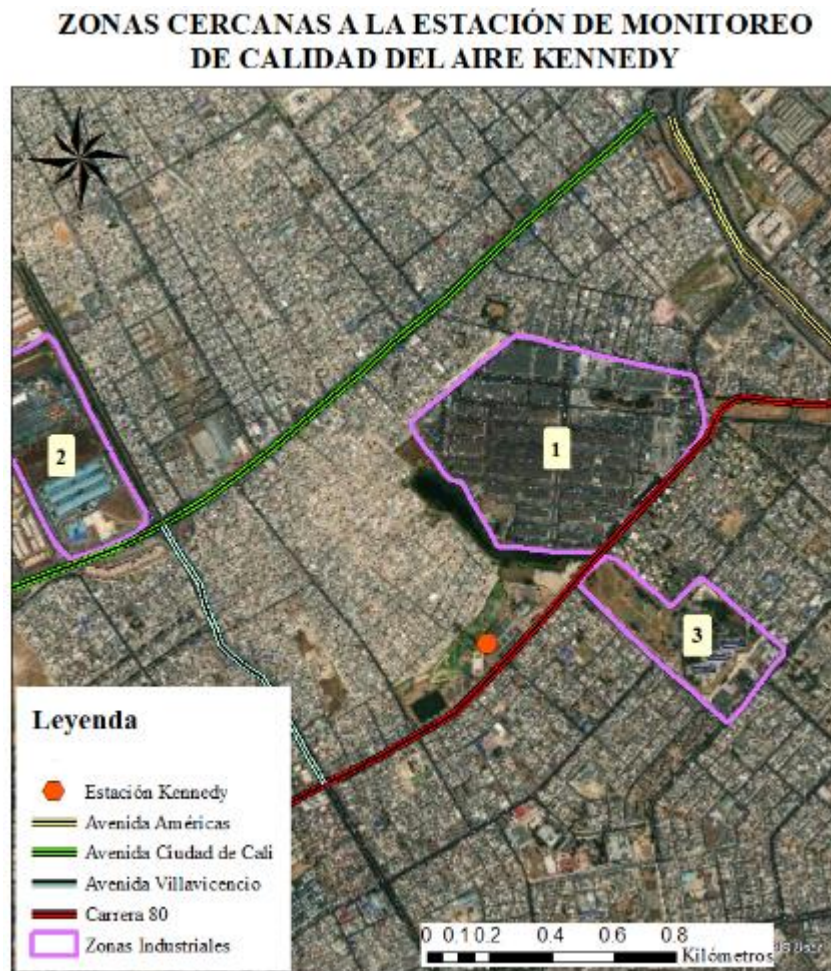
Cabe resaltar que, aunque la dispersión es mayor en la jornada del día sin carro del año 2019 se observan valores de concentración más altos que en el 2018 donde la dispersión fue representativamente baja y pese a estos comportamientos diferentes, ambos años presentan tendencias similares. Asimismo, cabe resaltar que la gráfica de puntos líneas número uno de la tabla 8 que corresponde a la estación de Carvajal, se evidencia que las concentraciones de $PM_{2.5}$ para el 2018 y particularmente 2019 excedieron en gran medida no solo los límites permisibles de concentración dados por la OMS sino los valores máximos reglamentados para la ciudad de Bogotá con mediciones que alcanzaron aproximadamente los $65\mu g/m^3$ y los $80\mu g/m^3$ respectivamente, en las horas de la mañana de las 5 a las 11 aproximadamente, así como también se presentaron valores que en 2019 excedieron ambos límites en las horas de la tarde desde las 4 hasta las 24 horas. Estos resultados estuvieron directamente relacionados con la altura de capa de mezcla y la estabilidad atmosférica para el periodo de estos dos años ya que la primera evidenció una tendencia que cumple con la descripción general expuesta anteriormente donde en las horas de la mañana y en las horas de la tarde-noche registra valores bajos y constantes y la segunda cambia de inestable a neutral en el mismo rango de tiempo. A partir de esto, se puede deducir que el horario que tiene mayores cargas contaminantes corresponde al periodo en el que más hay movilización de personas o también llamadas

“horas pico” tanto en la mañana como en la tarde, lo cual implicaría un incremento de la exposición por parte de bici-usuarios y peatones durante la jornada del día sin carro.

Esta descripción es un punto de partida para determinar que en esta zona los lugares más afectados son aquellos que se ubican en la dirección suroeste del lugar de medición y corresponden a sectores comerciales donde puede haber un alto flujo poblacional, además, esta UPZ está clasificada como residencial consolidado donde se establecieron con predominancia barrios de estratos 2 y 3 (Secretaría Distrital de Planeación, 2012).

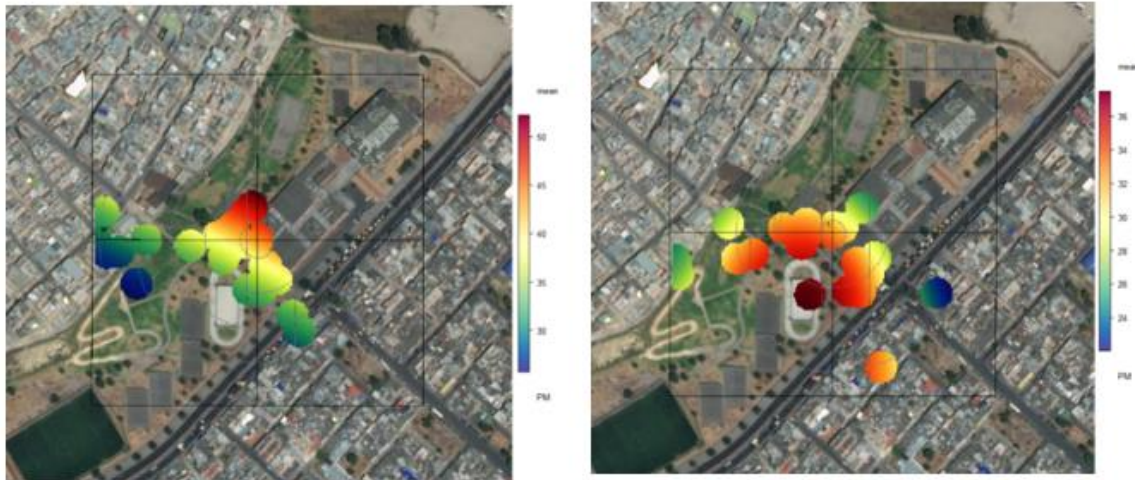
Estación de monitoreo de calidad del aire Kennedy

Figura 13. Mapa de las zonas cercanas a la estación de monitoreo de calidad del aire Kennedy



Fuente: Elaboración propia con referentes del mapa UPZ Kennedy Central, usos predominantes del año 2012. Alcaldía Mayor de Bogotá. (2013, p51).

Figura 14. Sobreposición de las gráficas polares de la estación de calidad del aire Kennedy para los años 2018 y 2019



Fuente: Elaboración propia

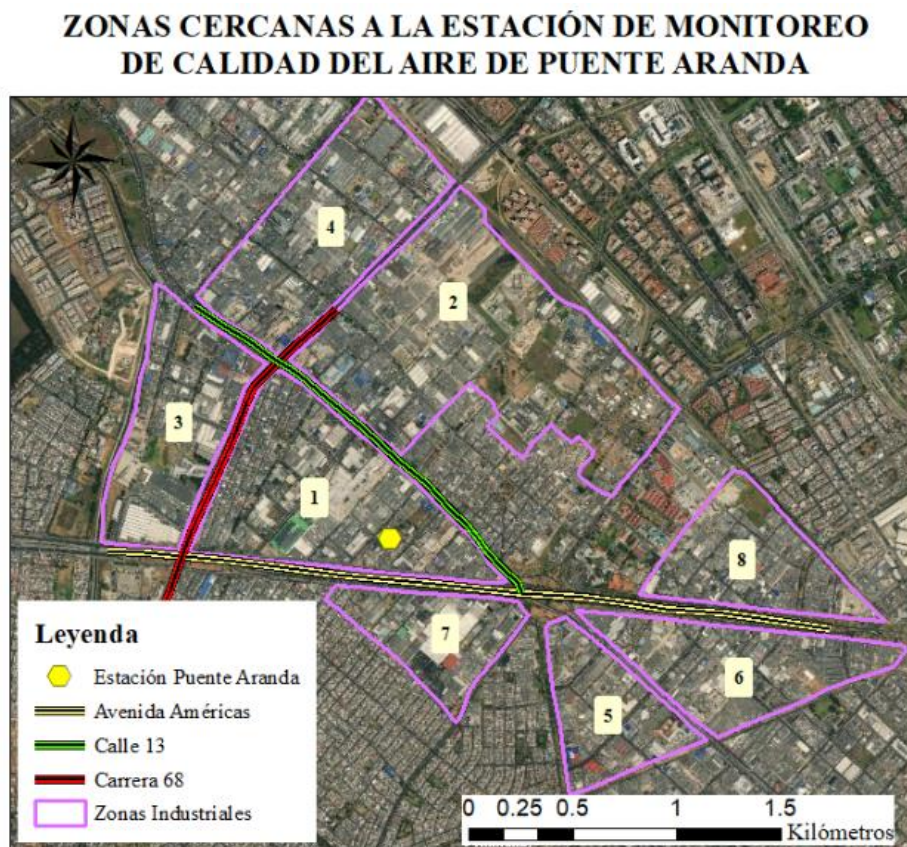
Esta estación también se encuentra en la localidad de Kennedy en la UPZ 47 que corresponde a Kennedy Central. Es una estación de fondo, lo que quiere decir que la contaminación medida no está influenciada de forma directa por alguna fuente en especial, sino que varias fuentes contribuyen a mayor concentración de contaminantes a causa del régimen de vientos (Secretaría Distrital de Planeación, 2012) y que concuerda con lo estudiado en las gráficas polares para esta estación en el objetivo número uno, donde no se encontró una tendencia en el comportamiento de vientos. Sin embargo, los resultados indican que posiblemente esta estación se esté transformando en una estación de tráfico, porque pese a que su origen de diseño correspondía a otro tipo de medición, las condiciones que han cambiado en el entorno de su instalación pueden generar que se registren mayores niveles de contaminantes, aunque se encuentre relativamente alejada de áreas industriales o de alto tráfico, pero estas dinámicas de cambio dentro de este sector de la ciudad aumentan las concentraciones que está midiendo la estación.

Es así como esta zona se ve afectada por fuentes móviles que transitan en especial por vías como la Carrera 80, la Avenida primera de mayo, la avenida Américas y la ciudad de Cali, además de esto, existen vías que no se encuentran pavimentadas o poseen algún grado de deterioro, generando la presencia de partículas suspendidas en la atmosfera (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2004). También, se deben tener en cuenta algunas zonas particulares que pueden ser fuentes importantes de contaminación como se pueden observar en la zona Norte del punto de medición en la figura 13 y en color violeta oscuro en el mapa la cual corresponde a la zona comercial número 1 y pese a que en sí misma no es una fuente generadora de gases contaminantes, gracias a su ubicación, numerosos vehículos de carga transitan constantemente en esta área por la vía Villavicencio y la Avenida ciudad de Cali provenientes de la autopista Sur y debido a esto se infiere que son las condiciones de transporte lo que no permite una buena dilución de los contaminantes. Asimismo, se puede observar una coloración violeta clara al sur que corresponde a un proyecto de construcción el cual puede contribuir a la generación de material particulado.

En la gráfica de puntos para la localidad de Kennedy ubicada en la tabla 18 para los años 2018 y 2019 se evidenciaron ciertas particularidades: La primera es que para los dos años en las horas de 5 a 11 de la mañana se presentaron incrementos de 85 a $95 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y la segunda es que en el año 2019 en casi todo el rango de horas de medición excedieron los límites permisibles dados tanto por la OMS como por la normatividad colombiana llegando a valores de $85 \mu\text{g}/\text{m}^3$ hasta los $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente, concordando con las concentraciones evidenciadas en la figura 14, y como se puede observar en el año 2018 se presentaron más concentraciones de $PM_{2.5}$ y menor dispersión que en el año 2019, sin embargo, ambas comparten la similitud de un movimiento de las masas de aire con $PM_{2.5}$ hacia el sur con tendencia a inclinarse un poco hacia el oeste, concordando con los resultados descritos de la tabla 24.

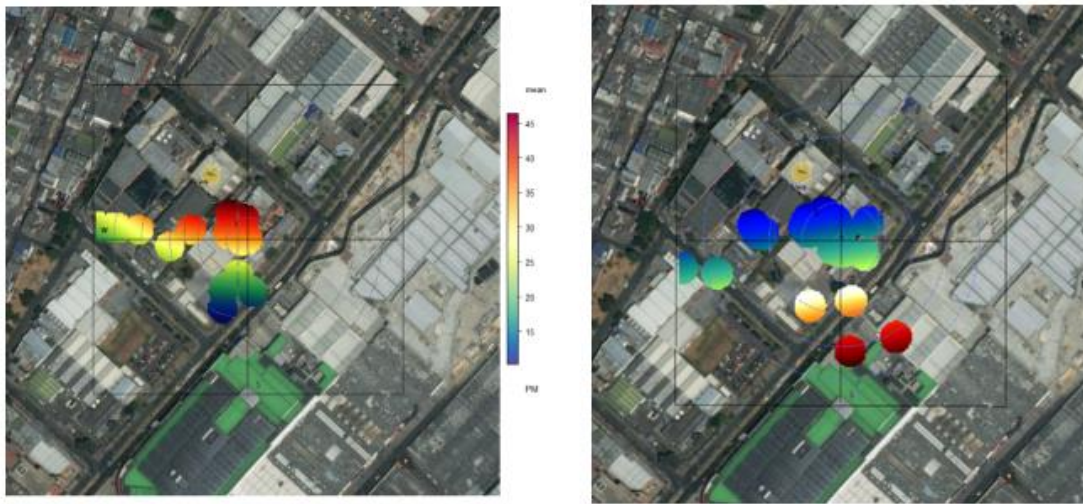
Estación de monitoreo de calidad del aire Puente Aranda

Figura 15. Mapa de las zonas cercanas a la estación de monitoreo de calidad del aire Puente Aranda



Fuente: Elaboración propia con referentes del mapa UPZ Puente Aranda, usos predominantes del año 2012. Alcaldía Mayor de Bogotá. (2013, p47)

Figura 16. *Sobreposición de las gráficas polares de la estación de calidad del aire Puente Aranda para los años 2018 y 2019*



Fuente: Elaboración propia

La de calidad del aire Puente Aranda, se ubica en la localidad de Puente Aranda, específicamente en la UPZ 111 denominada también Puente Aranda. Esta estación es de tipo industrial, por lo tanto, se ve influenciada por las emisiones provenientes de fábricas distribuidas en las áreas numeradas del 1 al 8 de la figura 15, lo cual concuerda con el uso actual del sector ya que es predominantemente industrial y según la Cámara de Comercio de Bogotá (2007), las actividades económicas corresponden a las empresas manufactureras, de plásticos, plaguicidas, actividades de impresión y trabajo de metales principalmente.

Estas compañías se ubican en la parte Norte y Este del punto de muestreo y sus emisiones se dirigen hacia el Suroeste donde se encuentra el área residencial de la localidad según se evidencia en la figura 16. Además, este punto se ve influenciado por la Avenida de las Américas en el costado sur del punto de medición, la carrera 68 al Noroeste y al Noreste por la calle 13 que durante la jornada del día sin carro presentan mayor flujo vehicular.

Cabe mencionar que en la gráfica de puntos y líneas para la estación de calidad del aire Puente Aranda, ubicada en la tabla 18, se observa que el año que presentó mayores valores registrados de $PM_{2.5}$ durante la jornada del día sin carro fue el 2018 con una máxima concentración de $66 \mu g/m^3$ alrededor de las 9 de la mañana que, sumado con una altura de capa de mezcla constante, relativamente baja y una estabilidad atmosférica entre estable y neutra como se observa en la tabla 32, mientras que el año 2019, presenta una mayor dispersión con concentraciones máximas de $40 \mu g/m^3$. Asimismo, un aspecto importante es resaltar el flujo de población significativo que llegan a estos sectores durante el día por la alta oferta de empleo y por lo tanto se puede decir que hay más personas expuestas al contaminante.

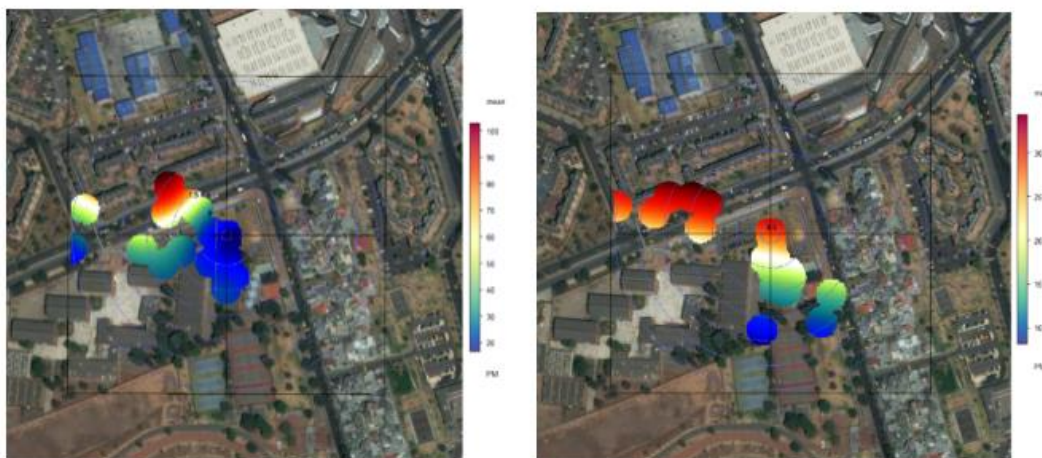
Estación de monitoreo de calidad del aire Tunal

Figura 17. Mapa de las zonas cercanas a la estación de monitoreo de calidad del aire Tunal



Fuente: Elaboración propia con referentes del mapa UPZ Venecia, usos predominantes del año 2012. Alcaldía Mayor de Bogotá. (2013, p24)

Figura 18. Sobreposición de las gráficas polares de la estación de calidad del aire Tunal para los años 2018 y 2019



Fuente: Elaboración propia

La estación de monitoreo de calidad del aire Tunal, se ubica en la UPZ 42 denominada Venecia, se caracteriza por ser de fondo, por lo tanto, no registra puntos emisión directos de gran influencia y la concentración de las mediciones proviene de diversos factores donde el más significativo es el viento, así como también se identificó en la estación de Kennedy.

Partiendo de la descripción de las gráficas polares ubicadas en la tabla 30 para la estación Tunal, las rosas de viento del anexo 1, la figura 17 y 18, se puede observar que las coloraciones rojas no presentan una dispersión rápida y por ello la exposición a los contaminantes es mayor, teniendo en cuenta que el principal uso del suelo en este sector es residencial. Además, se denota que hay una tendencia no muy definida del viento que proviene desde la zona Norte donde la localidad de Tunjuelito, a la cual pertenece Tunal, limita con las localidades de Kennedy y Puente Aranda las cuales se evaluaron anteriormente como puntos críticos de contaminación y que probablemente por acción del viento se presente un arrastre de contaminantes hacia la parte Sur de Tunal. De igual modo, se evidencian diferencias significativas entre los dos años evaluados, debido a que el 2018 presentó concentraciones de PM_{2.5} extremadamente altas superando los límites permisibles tanto para la OMS como los establecidos para Colombia. Se ha notado que estos cambios se produjeron aproximadamente desde las 8 de la mañana hasta las 2 de la tarde donde se registraron valores que excedieron los 100µg/m³ lo que concuerda con el punto máximo de la gráfica de puntos y líneas en la tabla 18 para esta estación. Durante el mismo periodo de tiempo la altura de capa de mezcla fue baja, igual que en las horas de la tarde entre las 5 pm a las 24 pm donde la estabilidad atmosférica en este horario pasó de ser moderadamente estable a neutral en horas de la mañana y de neutral a moderadamente estable en la tarde, situación que coincide con las horas de mayor flujo poblacional.

Es importante resaltar algunas zonas en particular que pueden ser fuentes de emisión del contaminante PM_{2.5} como lo son la Avenida Boyacá al Oeste y la Autopista sur al Norte del punto de medición. También, en la parte Noroeste se encuentra una zona industrial denotada con coloración violeta claro que corresponde principalmente a fábricas manufactureras y a actividades de curtiembres, mientras que en la zona Sur-Oeste entre la Avenida Villavicencio y la Transversal 44; se encuentra el Portal de Transmilenio El Tunal (Galindo, 2013).

Con los resultados anteriormente descritos se encontraron varias relaciones de causalidad al identificar los posibles focos de emisión del contaminante PM_{2.5} como lo corrobora el estudio de Villegas (2017), citado en el marco de referencia donde reporta que los puntos en los que hay mayor concentración promedio de PM₁₀, corresponden a los que se encuentran ubicados en las estaciones de Carvajal-Sevillana, Kennedy, Puente Aranda y Suba, donde hay concentraciones cercanas e incluso mayores a los 70 µg/m³.

Con base en esto, cabe resaltar que además de las zonas industriales y manufactureras que se encontraron alrededor de varios de estos puntos, se logró reconocer un punto en común que presentan las áreas estudiadas en este apartado y es la presencia de vías principales en torno a los puntos de medición. Teniendo en cuenta lo anterior, se hace nuevamente una referencia a la malla vehicular con la que cuenta Bogotá descrita en el marco geográfico, donde se puede observar que, en conjunto, existe un elevado porcentaje de vehículos, especialmente de transporte público que operan con motores diésel y son los que quedan habilitados en la jornada del día sin carro y que transitan en un

mayor volumen por las vías principales mencionadas. Enfatizar en este tema, es de interés debido a que los hidrocarburos resultantes del PM₁₀ y PM_{2,5} generados por el diésel (DPM) se componen principalmente de carbono y en menor medida componentes de compuestos orgánicos provenientes de los elementos del combustible que no se quemaron en el proceso como el aceite lubricante, compuestos inorgánicos como cenizas (minerales inorgánicos) y compuestos de azufre (Gatts, y otros, 2012). De acuerdo con Kittelson (1998), citado por Venkateswara y Prasad (2010) la estructura típica de partículas generadas por un motor diésel de un vehículo de transporte público bajo un ciclo de funcionamiento se descompone de la siguiente manera: carbono 41%; combustible no quemado 7%; aceite sin quemar 25%; sulfato y agua 14%; y cenizas y otros componentes 13% en promedio, puesto que se debe tener en cuenta la posible variación de estos porcentajes dependiendo del diseño del motor y las condiciones de operación y composición del combustible. Estos compuestos son de particular preocupación porque varios de ellos han sido asociados con carcinogenicidad y mutagenicidad, como se ha corroborado en numerosos estudios de laboratorio (Venkateswara y Prasad 2010).

Los contaminantes que generan estos combustibles con frecuencia se emiten en los alrededores de donde vive y trabaja la población. Las emisiones son liberadas a nivel del suelo y por las condiciones que se expusieron anteriormente, permanecen suspendidos en el aire. Estos contaminantes ingresan al cuerpo a través de la respiración y algunos de los llamados DPM son lo suficientemente grandes como para ser visibles en algunas ocasiones en forma de humo gris o negro, mientras que la mayoría están en el sub invisible de la gama de micrómetros, estas partículas difieren en tamaño, composición, solubilidad y, por lo tanto, también en su propiedad tóxica (Venkateswara y Prasad 2010).

Después de esta discusión se determinó que los valores de concentración de PM_{2,5} en estas zonas son significativamente altos y representan un peligro de gran magnitud para la población teniendo en cuenta la densidad de personas que circulan en estas áreas. Además, se evidencio un exceso de los límites permisibles, debido a que actualmente no se están respetando los cambios en la normativa la cual consistió en pasar el límite de 50 µg/m³ de PM_{2,5} a 37 µg/m³ a partir del 1 de julio del año 2018, lo que demuestra que en la práctica se hizo natural superar los 40 µg/m³ como ocurrió en el año 2016 donde, según un estudio de la Secretaría de Ambiente en este año, la concentración anual de PM₁₀ fue de 45 µg/m³, valor que en ese entonces cumplía con el estándar nacional pero excedía el límite permisible establecido por la OMS de 25 µg/m³ (Villegas y Parra, 2017). Los hallazgos anteriormente descritos, se pueden apoyar con estudios previos realizados en Bogotá, donde Kennedy ha sido caracterizada por haber presentado las condiciones de concentración de material particulado más críticas puesto que el “81,6% de las mediciones de este contaminante se ubicaron en categoría moderada, 16,2% en categoría dañina a la salud de grupos sensibles y 0,2% correspondieron a Dañinas a la Salud” (IDEAM,2016, p.73).

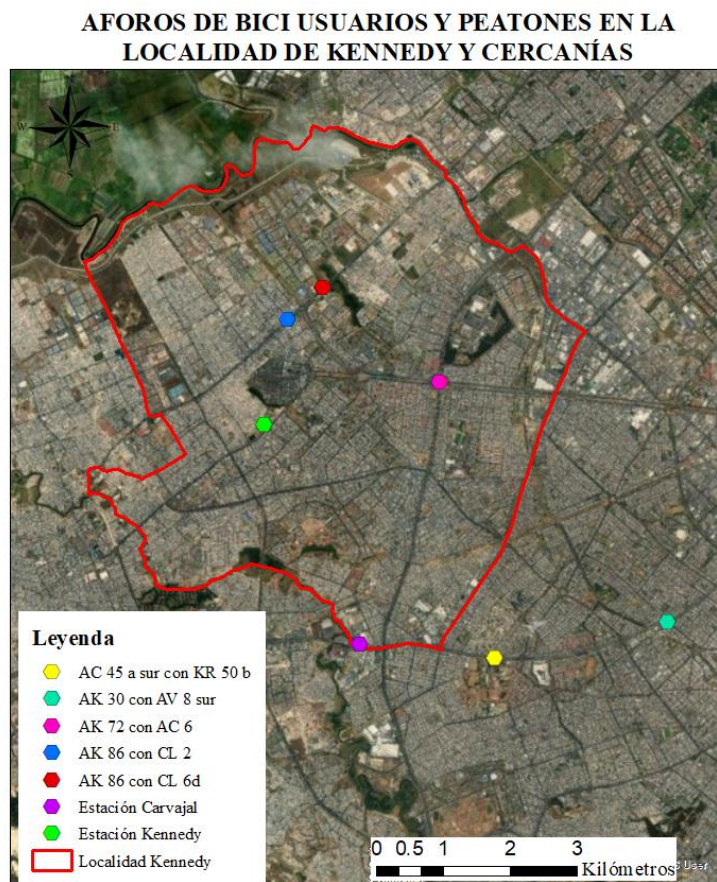
8.2.3. *Análisis de exposición de bici-usuarios y peatones en la localidad de Kennedy*

Una vez se plantearon las relaciones de las anteriores etapas, se escogió la localidad de Kennedy para analizar la exposición de bici-usuarios y peatones, ya que en esta se ubican dos estaciones que se analizaron en el apartado anterior, es la segunda localidad en Bogotá con mayor cantidad de habitantes proyectados para el 2019 según el DANE con 1'252,014 personas (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2018), está clasificada como área-fuente de contaminación Clase I según el artículo 4 del Decreto 623 del

2011 y fue una de las localidades declarada con alerta naranja durante el mes de febrero del año 2019 (Parra, 2019).

Por consiguiente, se tuvo en cuenta los aforos realizados en el año 2017 y 2018 por el SIMUR. Se debe aclarar que no se utilizaron datos del 2019 debido a que no se habían actualizado los registros para ese año. Las direcciones escogidas fueron aquellas donde se realizaron los conteos en la localidad de Kennedy o en puntos cercanos a esta, ubicados en Puente Aranda, que se pueden observar en la figura 19, identificando 3 direcciones con conteos de bici-usuarios y uno de peatones para cada año, los cuales se explicaron con más claridad en el apartado de metodología.

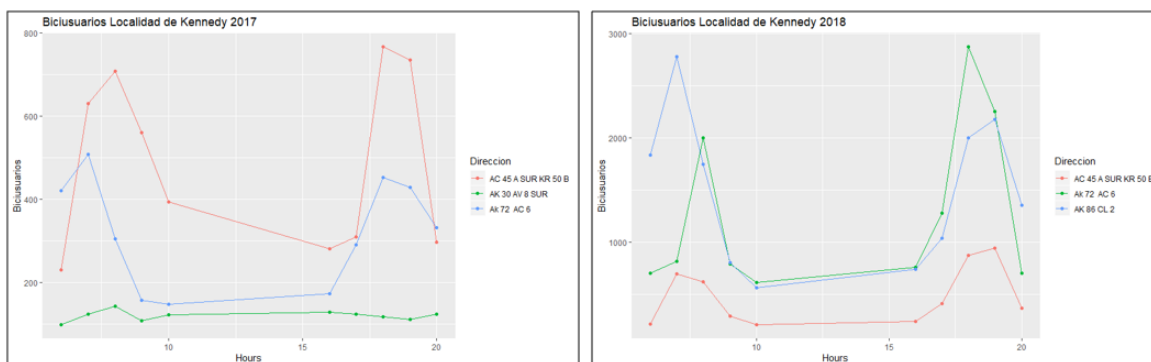
Figura 19. Mapa de las ubicaciones de los aforos de bici-usuarios y peatones en la localidad de Kennedy y cercanías



Fuente: Elaboración propia

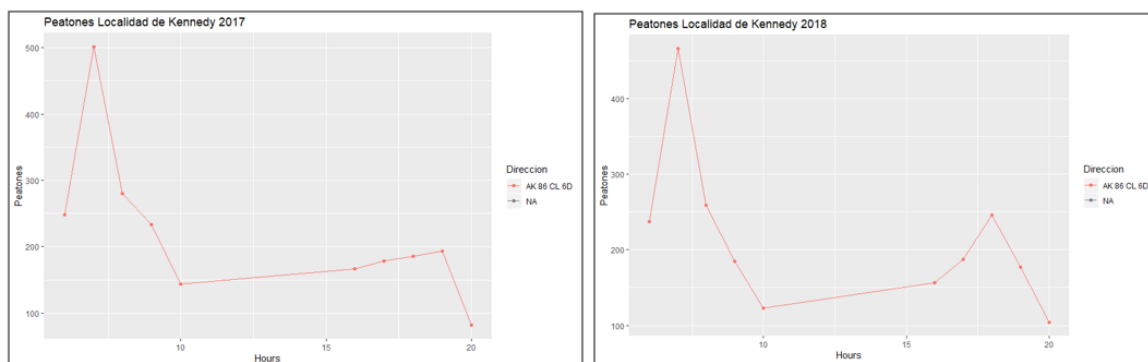
A partir de la información recolectada de los aforos, se realizaron las gráficas #1,2,3,4 en RStudio versión 3.6.1 con el fin de identificar la cantidad de población expuesta en determinadas horas del día y los flujos de movilización, las cuales, se pueden observar a continuación.

Figura 20. *Conteo de bici-usuarios y peatones en la localidad de Kennedy para los años 2017 y 2018*



Fuente: Elaboración propia

Figura 21. *Conteo peatones en la localidad de Kennedy para los años 2017 y 2018*



Fuente: Elaboración propia

A partir de las figuras 20 y 21 se pudo determinar las horas del día en las cuales se desplazaron mayor cantidad tanto de bici-usuarios como de peatones, durante las jornadas del día sin carro de los años 2017 y 2018, las cuales, estuvieron comprendidas entre las de 6 am a las 8 am y las 5 pm a las 8 pm. Igualmente, se puede destacar que al comparar los aforos de los dos años en las mismas direcciones, como es el caso de la calle 45 A sur con carrera 50 B, el flujo de bici-usuarios se mantuvo con valores de aproximadamente 800 personas en la hora pico de la mañana y aumentó en la tarde noche de 800 en 2017 a casi 1000 bici-usuarios en el 2018, en el caso de la Avenida carrera 72 con Avenida calle 6, si se logró observar un crecimiento relevante puesto que para el año 2017 se registraron valores máximos de 500 bici-usuarios en la mañana y 450 en la tarde, mientras que en 2018 los conteos fueron de casi 2000 personas en horas de la mañana y 3000 en horas de la tarde, lo cual indica un crecimiento de la población que participa en las actividades de desplazamiento en bicicleta durante la jornada del día sin carro. Las otras dos direcciones que se tuvieron en cuenta para estos dos años pese a que fueron diferentes porque no se presentaron conteos en el mismo punto, demuestran tener valores notables de participación. En cuanto al aforo de peatones, se evidenció que tienen un patrón muy similar de un año a otro, pero se denota un leve incremento en las horas de la tarde con alrededor de 200 personas contadas en el 2017 y 250 en el 2018. Según los resultados, se identificó un incremento de bici-usuarios y peatones en las horas pico de la tarde en comparación a las horas de la mañana.

En este mismo horario, se presentaron diversos factores analizados en los apartados anteriores que aumentaron el nivel de exposición de la población estudiada, el primero de ellos fue la altura de capa de mezcla que en las horas de la mañana y en la tarde noche registro valores bajos y en cuanto a la estabilidad atmosférica, esta tuvo un comportamiento neutral. Así mismo, para el año 2017 y 2018 en la estación de Carvajal se presentaron picos de PM_{2.5} en el horario de 5 am a 10 am que alcanzaron un máximo de aproximadamente 68 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 8 de la mañana, de igual modo en la estación de Kennedy para el mismo horario alcanzo concentraciones de 85 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Además, la dispersión que se analizó para estas zonas fue baja demostrando que la acción de los anteriores factores en conjunto aumenta la exposición de la población estudiada.

Las afirmaciones descritas anteriormente han sido corroboradas por estudios como el de Berghman y otros (2009), en el que se analizaron los niveles de exposición de los ciclistas a partículas ultra finas y PM₁₀ encontrando que en las horas de la mañana están casi dos veces más expuestos que en las horas de la tarde debido al incremento del flujo vehicular especialmente en vías principales, al realizar el desplazamiento hacia su lugar de trabajo. De manera similar, ocurrió en una investigación realizada en Nueva Zelanda en la que se estudió la concentración de PM_{2.5} en lugares cercanos a vías principales, donde los resultados indicaron que el contaminante también tuvo concentraciones más altas en la horas de la mañana, así como se analizó la exposición de bici-usuarios a estos niveles de contaminación obteniendo que en un periodo de 24 minutos de recorrido hacia el lugar de trabajo, en promedio para un bici usuario se presenta un riesgo de exposición del 21%, el cual podría reducirse a la mitad si se evitan rutas en vías principales (Pattinson y otros, 2017), es así, como en Bogotá un desplazamiento hacia el área de trabajo en bicicleta, en promedio, toma 43 minutos (Secretaría de Movilidad, s.f.) y suponiendo que en el día sin carro este periodo se reduzca a la mitad a causa de las facilidades de movilización para los bici-usuarios, como lo es la posibilidad de transitar por algunas vías principales, por ejemplo en el año 2018, la Avenida Boyacá en el punto de intersección con la Avenida Américas presentó en las horas pico tanto de la mañana como de la tarde-noche valores de alrededor 2000 y 3000 bici-usuarios respectivamente como se puede observar en la figura 20, existiría un nivel similar de exposición al encontrado por el estudio, teniendo en cuenta que durante las jornadas del día sin carro en Bogotá, los ciclistas transitan en separadores contiguos a las vías principales que pese a que no cuentan con el tránsito de vehículos particulares, están habilitadas para el transporte público y de carga pesada que como se ha descrito anteriormente en el presente trabajo, genera altas cargas contaminantes a causa del combustible que utiliza.

En concordancia con estas afirmaciones, es pertinente mencionar el estudio de Pattinson, y otros (2017), que también evaluó la exposición de los desplazamientos en bicicleta en carreteras principales y lejos de las mismas a modo de comparación, evidenciando que se reducían significativamente los riesgos asociados a estos contaminantes al movilizarse por rutas secundarias. Asimismo, en Australia se determinó que al utilizar vías de baja exposición, se inhalan porcentajes representativamente menores de PM_{2.5} en comparación a las vías de alta exposición por medio de la asociación de frecuencias cardiacas, ventilación del ciclista y registros de cargas contaminantes por las áreas estudiadas (Xia y otros, 2015), situación que es confirmada por la premisa de que un ciclista podría incrementar su riesgo a la salud por la proximidad al escape de los vehículos (Berghmans, 2019). Estos hallazgos sustentan, las condiciones en los resultados encontrados para la jornada del día sin carro en Bogotá, al identificar que las direcciones en las que fueron tomados los aforos se encuentran

ya sea en vías con separadores o en ciclo rutas al costado de vías principales como la Avenida Cali, la Avenida Boyacá y la autopista sur, las cuales parecen presentar una relación directa con los altos valores obtenidos de PM_{2.5}

Por otra parte, los peatones en la jornada del día sin carro que se movilizan en Transmilenio, buses SITP o tradicionales, también presentan un grado de exposición considerable teniendo conteos para los años 2017 y 2018 en los que se observa el paso de aproximadamente 500 personas por las calles seleccionadas. Sin embargo, su exposición es menor en comparación a la de bici-usuarios no solo por ser menor cantidad de personas sino también por no realizar actividad física demandante durante su desplazamiento, como lo prueba un estudio hecho en Barcelona en el que se compararon la exposición en los viajes de ciclistas, peatones y conductores de automóviles al lugar de trabajo (Nazelle y otros, 2012).

Otro factor importante al evaluar la exposición, es que la infraestructura en la localidad de Kennedy es urbana con predominancia de áreas con edificios y zonas industriales, como se desarrolló con mayor detalle en el apartado anterior en los análisis de dispersión sobre las áreas seleccionadas, lo que según Berghmans y otros (2009) impide el movimiento del viento y aumenta la aglomeración de contaminantes que no se diluyen adecuadamente llegando a incrementar el riesgo en la población expuesta.

Todos estos elementos se ven reflejados en los efectos perjudiciales que se pueden presentar en la salud ya que no solo es relevante el nivel de contaminación al cual está siendo expuesto un peatón o bici usuario sino al tiempo que permanece inhalando PM_{2.5} como lo señalan el estudio Torres y Galindo, (2016) en el que aproximadamente 300.000 bici-usuarios participantes de las jornadas de ciclismo recreativo, solo en la carrera séptima de Bogotá, presentaron un alto grado de vulnerabilidad al empeorar enfermedades cardiopulmonares y respiratorias, que según la Agencia Internacional para la investigación del Cáncer, citada por Díaz, Rojas, Rojas y Rodríguez (2018) que ha clasificado la contaminación del aire como carcinogénica. Estas condiciones de gravedad se pueden presentar dependiendo del tamaño de estas partículas, las más pequeñas penetran profundamente en los pulmones y pueden acumularse allí con el tiempo, así como pueden entrar al torrente sanguíneo e incluso llegar al cerebro, las partículas gruesas de hollín pueden quedarse en la tráquea causando irritación y el material particulado proveniente del diésel se deposita en la nariz, garganta y pulmones propiciando síntomas como tos e irritación en las zonas donde se encuentran (Venkateswara y Prasad, 2010).

Los hallazgos de correlación encontrados para la localidad de Kennedy van de la mano con investigaciones que se han realizado en los últimos años que confirman las condiciones de riesgo a las cuales se ve expuesta la población que se moviliza en esta localidad particularmente ya que fue clasificada según el “Informe del Estado de Calidad del aire en Colombia 2011-2015”, citado por Cortés (2018), como la localidad con más aire contaminado de Bogotá. Por lo tanto, es de vital importancia tener en cuenta factores como los que se han venido analizando a lo largo de este trabajo al momento de programar planes de contingencia o medidas para mitigar la contaminación del aire en la ciudad, en especial aquellas zonas como la localidad de Kennedy que presenta altas concentraciones de contaminantes atmosféricos.

8.3. Resultados y análisis del tercer objetivo

Para recomendar alternativas que fomenten la reducción de posibles riesgos por exposición a PM_{2.5} en las jornadas del día sin carro teniendo en cuenta hallazgos y resultados de la investigación, se identificaron los bici-usuarios como la población en riesgo y para ello se propone mover para otra fecha la jornada del día sin carro en Bogotá y otras medidas adicionales, partiendo de que actualmente la ciudad de Bogotá D.C está buscando promover el uso de la bicicleta como medio de transporte de los ciudadanos y por lo tanto es importante que se tomen medidas para prevenir riesgos en la salud asociados a la exposición del contaminante PM_{2.5}.

Estas actividades, se pueden ver reflejadas en primera instancia en el Decreto 456 del 2018, por medio del cual se declaró a Bogotá como una de las capitales mundiales de la bicicleta con el fin de posicionar a la ciudad como un lugar turístico amigable con el uso de transportes alternativos, donde se le da prioridad de desplazamiento a los bici-usuarios y donde se realizan las inversiones que sean necesarias para que la ciudadanía transite de forma segura, tranquila, confiable y recreativa por las calles y vías de la ciudad. Según la Secretaría Distrital de Movilidad (2019), la jornada del día sin carro llevada a cabo el 2 de febrero del año 2019 ayudó a reafirmar lo estipulado en el anterior Decreto, con alrededor de 1.211.000 ciclistas que se movilizaron durante el día, registrando un incremento del 84% de bici-usuarios con relación a un día típico. Demostrando el crecimiento anual de la población que está dispuesta a participar en estas jornadas, lo que también se puede identificar en la figura 20 del apartado anterior, correspondiente al análisis de exposición de bici-usuarios y peatones. Además de esto, para motivar la creación de iniciativas que promueven el uso de la bicicleta, la Alcaldía de Bogotá otorgó estímulos económicos a propuestas gráficas para la imagen de la XII Semana de la Bicicleta que se realizó del 22 al 29 de septiembre del año 2019 (Alcaldía de Bogotá, 2019).

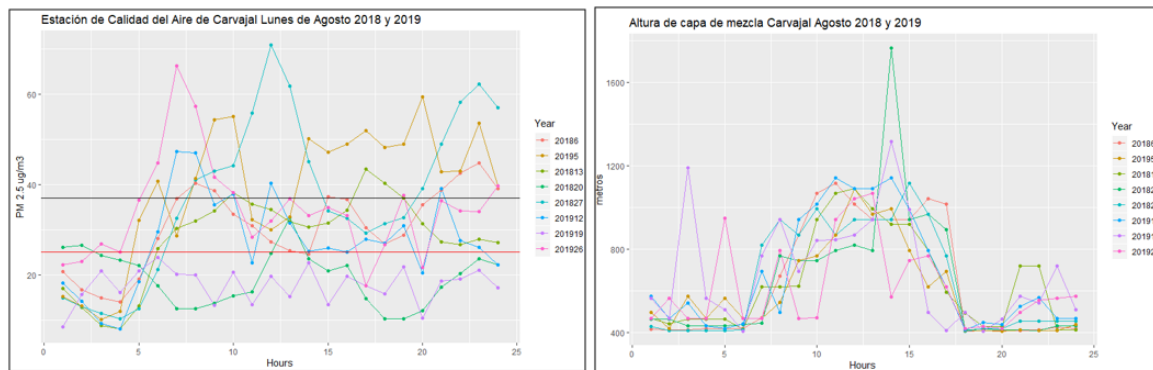
Asimismo, las actividades que fomentan la participación de los ciclistas y peatones como lo son las jornadas del día sin carro, apuntan a cumplir uno de los objetivos del Plan Maestro de Movilidad (Decreto 319, 2006) el cual plantea la priorización de transportes más sostenibles como el público o el no motorizado haciendo énfasis en la movilización en bicicleta. Además, dentro de este Plan, se estableció como una de sus políticas, el transporte sostenible, al ser la movilidad un derecho de las personas que debe contribuir a mejorar su calidad de vida. A su vez, se da respuesta a la actividad correspondiente a estimular el uso de sistemas alternativos de transporte acordes con los planes de movilidad del tercer objetivo de la Política de Prevención y Control de la Contaminación del Aire (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010) y, al dar respuesta a la implementación de esta política se estaría cumpliendo una de las actividades del cuarto objetivo de la misma política. En este sentido, cabe señalar que modelar la calidad del aire da respuesta al segundo objetivo de prevención y control de la calidad del aire y por ello al tener en cuenta herramientas como las utilizadas en la presente investigación donde se correlacionan elementos meteorológicos y concentración de contaminantes a través de modelos estadísticos, ya sea aplicados a medidas de contingencia como la jornada del día sin carro o en ámbitos más generales, se estaría dando cumplimiento al objetivo propuesto por la política (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010).

Partiendo de lo anterior, se debe tener en especial consideración las condiciones del entorno en el que se desarrollan estas actividades de promoción de alternativas al transporte convencional, ya que inciden significativamente en la salud de los participantes, como se ha mencionado en puntos anteriores. Por esta razón, y con base en el conjunto de resultados obtenidos en el presente proyecto, se ha establecido un periodo tentativo para realizar el día sin carro a modo de recomendación, teniendo en cuenta los factores climáticos y meteorológicos encontrados para la zona de estudio. Como se observa a lo largo del análisis, la jornada del día sin carro que tuvo lugar el 22 de Septiembre del 2015, presentó valores aceptables tanto en concentraciones del contaminante $PM_{2.5}$ como en las condiciones de dispersión, sin embargo, de la misma forma que se mencionó en el marco geográfico, este es un periodo caracterizado por presentar altas precipitaciones a causa del régimen bimodal de Bogotá y pese a que este factor muchas veces favorece la calidad del aire, si se quisiera tomar como posible fecha para programar la jornada del día sin carro se reduciría la participación de bici-usuarios y es posible que se generen reducciones en el flujo del tráfico vehicular generando mayores emisiones ya sea durante el día sin carro o en días previos generando una acumulación en la capa límite residual.

Mover la jornada para el mes de agosto. Por consiguiente, se seleccionó el mes de Agosto como referente para recomendar la programación del día sin carro por condiciones como la llegada de los vientos alisios que pueden contribuir a dispersar en mayor medida los contaminantes y pese a que es una época seca no tiene registros históricos de incendios forestales representativos (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2010), además, durante este mes se podría hacer una mejor promoción del día sin carro por la programación del festival de verano, evento realizado desde 1997 que usualmente es programado en los primeros días de Agosto y es de gran interés cultural, social y deportivo favoreciendo los lineamientos estipulados en la Ley 904 de 2004, la cual ha tenido algunas actualizaciones en los últimos años (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2019).

Partiendo de estas premisas, se seleccionaron otras fechas para realizar la jornada del día sin carro, las cuales fueron los lunes del mes en cuestión que corresponden a días de tráfico vehicular normal para los años 2018 y 2019, teniendo en cuenta que en los días sábado y Domingo no hay un alto tráfico de vehículos de carga pesada ni de transporte público, así lo han señalado informes técnicos como el de la empresa Ciudad Móvil (2014) donde en un día hábil se programan alrededor de 150 buses; los Sábados 105 y Domingos y festivos, 50. También existen registros que señalan una reducción del $PM_{2.5}$ en los fines de semana, en uno de ellos, la red de monitoreo de calidad del aire de Bogotá evidenció que 11 de las 13 estaciones presentaron condiciones favorables para el día Sábado (Semana Sostenible, 2019), y se han presentado reducciones de 44% de material particulado en días Domingo (El Espectador, 2019) y por estos factores, el remanente de contaminantes en la capa límite residual es menor, identificando que las cargas de contaminante posiblemente tendrán concentraciones más bajas. Para dar soporte a lo anterior, a continuación, se evidencia en la figura 22, las gráficas de líneas y puntos con la información de la concentración del $PM_{2.5}$ y de altura de capa de mezcla grafica para identificar si mejoran las condiciones de dispersión de las estaciones de monitoreo de la calidad del aire de Kennedy y Carvajal. Para comprender la leyenda de las gráficas, se debe aclarar que los 4 primeros dígitos de cada color corresponden al año y los siguientes, al día del mes de agosto.

Figura 22. Concentración de $PM_{2.5}$ y altura de capa de mezcla para los lunes del mes de agosto de los años 2018 y 2019 en la estación de calidad del aire Carvajal

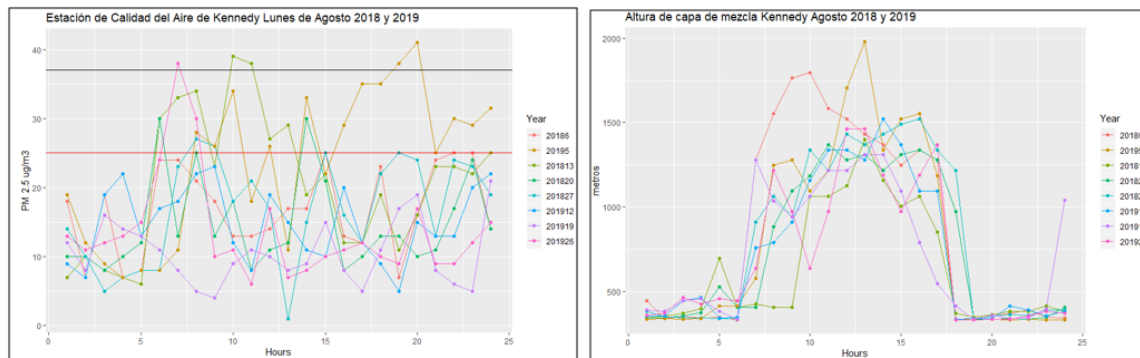


Fuente: Elaboración propia

En la figura 22 se observaron valores bajos del contaminante e incluso muchos de ellos no superan los límites permisibles establecidos por la normativa colombiana en comparación con los resultados expuestos en la gráfica 1 de la tabla 18 analizada en el objetivo número 1. También, en la gráfica generada para los días propuestos, se presentaron mayor cantidad de valores por debajo del límite permisible dado por la OMS y la concentración máxima fue menor que la encontrada en la gráfica 1 de la tabla 18, con valores de $70 \mu g/m^3$. En cuanto a la gráfica de altura de capa de mezcla de la figura 22 realizada para los días recomendados, se observa que esta comienza a incrementarse aproximadamente a las 5 de la mañana lo cual está acorde con un comportamiento normal ya que a estas horas empieza a incidir la radiación solar coincidiendo con las horas en las cuales inicia el flujo de personas que se desplazan a sus lugares de trabajo y estudio mientras que en la gráfica de las jornadas del día sin carro, la altura de capa de mezcla se mantiene baja y constante hasta alrededor de las 10 de la mañana. Además, se evidencia que antes de las 3 de la tarde no hay cambios abruptos en las alturas, lo que indica que no se manifiestan fenómenos de inversión térmica como sí se observaron en la tabla 32 para la estación de Carvajal y que el descenso de los valores van acordes con la reducción progresiva de la radiación solar.

De manera similar, ocurre con la evaluación de los días recomendados en la estación de Kennedy como se puede observar en la figura 23

Figura 23. Concentración de $PM_{2.5}$ y altura de capa de mezcla para los lunes del mes de agosto de los años 2018 y 2019 en la estación de calidad del aire Kennedy



Fuente: Elaboración propia

Como se denota en la figura 22, existe una diferencia muy marcada entre los días recomendados y las gráficas de los días en los que se realizó la jornada del día sin carro que se encuentran en la tabla 18 y 32. Debido a que, en la primera, casi la totalidad de valores se encontraron dentro de los límites permisibles para la ciudad e incluso, la mayor cantidad de estos, está por debajo de los límites dados por la OMS.

Por su parte, la gráfica de altura de capa de mezcla para la estación de calidad del aire Kennedy de la figura 23, presenta una tendencia similar a el caso de Carvajal, mostrando un comportamiento que en teoría es el que se debe presentar para que exista una mejor dispersión de contaminantes. Además, no se presentan inversiones térmicas tan marcadas como las que se presentan en la tabla 32.

En general se puede determinar que la alternativa planteada, presenta mejores condiciones de dispersión del material particulado y por lo tanto el nivel de exposición al cual estarían sometidos los bici-usuarios y peatones sería menor lo cual es reafirmado por estudios como el del IDEAM, (2016), en el que las mayores concentraciones de material particulado para el periodo de Enero a Marzo fueron registradas en las estaciones de Carvajal, Kennedy y Puente Arada, las cuales se asociaron a los vientos procedentes del Sur y el Suroeste y de la misma forma se observó que los meses en los que se obtuvieron menores valores de material particulado fueron los comprendidos entre Junio y Agosto a causa de la influencia de los vientos alisios como se menciona en otros apartados de este documento. Los efectos descritos previamente, las características climáticas explicadas en el marco geográfico y los hallazgos del presente proyecto indican que el periodo que se está teniendo en cuenta actualmente para realizar la jornada del día sin carro en Bogotá, no favorece las condiciones de dispersión del contaminante $PM_{2.5}$ y contribuye a incrementar el riesgo de la población objetivo correspondiente a bici-usuarios y peatones mientras que el periodo de tiempo propuesto en la recomendación si cuenta con condiciones favorables que incluso están apoyadas por otras investigaciones.

Otras alternativas complementarias. Sumado a lo anterior, se recomienda desarrollar otras alternativas, como:

- Utilizar y realizar estudios técnicos relacionados con calidad del aire: es necesario que Bogotá desarrolle estudios como el que se presenta en este documento a modo de base técnica e investigativa, para cumplir con los lineamientos de calidad del aire establecidos en la política pública de prevención y control de calidad del aire que busca mejorar las condiciones ambientales y sanitarias de la ciudad.
- Informar a la población sobre la calidad del aire: Para disminuir la exposición de la población, es necesario que esta conozca acerca del estado en el cual se encuentra el aire y los riesgos que pueden afectar su salud garantizando el principio de participación ciudadana que se encuentra consignado como un aspecto a ejecutar el plan decenal de contaminación del aire de la ciudad de Bogotá el cual establece que es obligación de las autoridades ambientales, informar sobre el estado de la calidad del aire a través de medios de comunicación masiva de manera clara por lo menos cada tres meses. A su vez, se sugiere hacer énfasis en aquellas zonas que han sido catalogadas como áreas críticas por sus altas concentraciones de PM_{2.5} a través de medios de comunicación didácticos y accesibles para toda la población como podrían ser la instalación de pantallas en puntos visibles en los que se presente la información de forma clara, actualizada y permanente.

9. Conclusiones

- Se consiguió cumplir con el objetivo general y los objetivos específicos del proyecto, evidenciándose que al determinar el comportamiento del PM_{2.5} durante las jornadas del día sin carro entre los años 2013 y 2019, y al analizar la relación del contaminante con las condiciones meteorológicas, de emisión y las características de posibles receptores, se logró recomendar una nueva fecha para realizar la jornada del día sin carro donde se redujo la exposición al PM_{2.5} de la población estudiada.
- Se concluyó, que la mayoría de datos registrados del contaminante PM_{2.5} en la red de monitoreo de calidad del aire superaron los límites permisibles establecidos por la OMS y la legislación colombiana durante las jornadas del día sin carro realizadas en la ciudad de Bogotá, encontrando que el año 2018 fue uno de los que presentó valores que excedieron los 80µg/m³ particularmente en la estación Kennedy donde las mediciones superaron los 100µg/m³. Además, se denotó el incremento de los valores medidos del contaminante en el periodo comprendido entre las 5 y las 11 de la mañana, tiempo en el cual se moviliza la población a sus lugares de trabajo.
- Se evidenció que usar modelos descriptivos como el aplicativo Openair, desarrollado en el lenguaje R, facilitó la comprensión del transporte del PM_{2.5} en el espacio geográfico estudiado, al tener en cuenta factores meteorológicos como la dirección y velocidad del viento que posibilitaron la identificación gráfica de las condiciones de dispersión que, sumadas con los resultados de altura de capa de mezcla y estabilidad atmosférica, permitieron encontrar que las estaciones de Kennedy, Carvajal, Puente Aranda y Tunal, fueron las que presentaron las condiciones más críticas en términos de concentración del contaminante.
- Dentro de los análisis expuestos para la localidad del Kennedy se encontró, que es necesario tener en cuenta la relación directa que existe entre las condiciones meteorológicas y de emisión que condicionan la exposición de bici-usuarios y peatones, entre ellos se destacan los periodos de lluvia característicos para Bogotá, los horarios en los que hay mayor movilización y el aumento anual de participantes en las actividades propuestas en la jornada del día sin carro, con el fin de generar una buena toma de decisiones que promueva la transición a medios de transporte alternativos y que contribuyan a la política pública de prevención y control de la contaminación del aire.
- En conclusión, la alternativa propuesta de cambiar la fecha de la jornada del día sin carro a un lunes del mes de agosto, reduciría la exposición de la población estudiada debido a que se encontró que la concentración de PM_{2.5} es menor ya que las condiciones climáticas y meteorológicas favorecen la inestabilidad atmosférica, el incremento de la altura de capa de mezcla y una reducción del contaminante en la capa límite residual, además, de apoyarse de otras alternativas como generar mayor acceso de la ciudadanía a la información acerca del estado de la calidad del aire.
- A nivel profesional, se adquirió un aprendizaje que consistió en desarrollar la capacidad de acoplar diferentes conocimientos adquiridos a través de la carrera de Ingeniería Ambiental, particularmente aquellos relacionados con calidad del aire y salud ambiental, relacionando elementos técnicos y matemáticos con factores sociales y ambientales que contribuyen a la construcción de bases investigativas que aporten en la solución de problemáticas de contaminación del aire.

10. Recomendaciones

- Profundizar en la evaluación de las alternativas recomendadas en este proyecto para dar continuidad a la construcción de una o varias propuestas esquematizadas que se lleven a cabo forma práctica
- Incentivar el desarrollo de proyectos e investigaciones encaminados a evaluar de manera técnica y coherente la calidad del aire desde la academia.
- Establecer alianzas desde el entorno académico Universitario con diferentes instituciones y entidades para fomentar la articulación de conocimiento con el fin de disminuir barreras de información y generar productos sólidos que puedan ser llevados a la práctica con mayor facilidad.
- Actualizar constantemente la información de los temas ambientales por parte de las entidades encargadas para disminuir los errores técnicos a la hora de realizar estudios similares al presente trabajo y al realizar acciones que promuevan la descontaminación del aire.
- Desarrollar estudios cuyo enfoque sea realizar inventarios de emisiones con el fin de evaluar en qué medida las concentraciones de contaminantes son emitidas por fuentes móviles.

11. Referencias Bibliográficas

- Abreu, J. L. (2012). La formulación de los antecedentes del problema de investigación científica. *International Journal of Good Conscience*. 7(1), 1-6. Recuperado de: <https://docplayer.es/14869427-La-formulacion-de-los-antecedentes-del-problema-de-investigacion-cientifica-the-formulation-of-the-scientific-research-problem-background.html>
- Alcaldía Mayor de Bogotá. (26 de septiembre de 2000). *Por el cual se adoptan las medidas tendientes a hacer efectiva la consulta popular realizada en el Distrito Capital el 29 de octubre de 2000. [Decreto 1098 del 2000]*. Recuperado de: http://legal.legis.com.co/document/Index?obra=legcol&document=legcol_75992041b288f034e0430a010151f034
- Alcaldía Mayor de Bogotá. (2004). *Diagnóstico físico y socioeconómico de las localidades de Bogotá, D.C/Kennedy*. Recuperado de: <http://www.shd.gov.co/shd/sites/default/files/documentos/RECORRIENDO%20KENNEDY.pdf>
- Alcaldía Mayor de Bogotá. (2010). Análisis de la ocurrencia de incendios forestales en bogotá d.c., durante el fenómeno del niño 2009 – 2010. (inf. téc). Recuperado de: http://ambientebogota.gov.co/c/document_library/get_file?uuid=946af56c-385b-4cb6-aa64-f40f26862c5b&groupId=10157
- Alcaldía Mayor de Bogotá. (2013). *Dinámica de la construcción por usos localidad Kennedy 2002-2012. (info tec)*. Recuperado de: <https://docplayer.es/27714371-Dinamica-de-la-construccion-por-usos-localidad-kennedy.html>
- Alcaldía Mayor de Bogotá. (2013). *Dinámica de la construcción por usos localidad Puente Aranda 2002-2012. (inf. tec)* Recuperado de: <http://www.inventariobogota.gov.co/index.php/es/send/13-catastro/2398-dinamica-de-la-construccion-por-usos-localidad-puente-aranda>
- Alcaldía Mayor de Bogotá. (2013). *Dinámica de la construcción por usos localidad Tunjuelito 2002-2012. (inf. tec)*. Recuperado de: <http://www.cieeie.gov.co/index.php/es/send/13-catastro/1666-dinamica-de-la-construccion-por-usos-localidad-de-tunjuelito-anos-2002-y-2012>
- Alcaldía Mayor de Bogotá. (2014). *Informe de Estrategias de ordenamiento para el territorio Nacional, Anexo 14 del Documento Técnico 04. Mapa de Amenaza por Incendios Forestales – Escala 1:25.000. (informe técnico)*. Recuperado de: http://www.sdp.gov.co/sites/default/files/CONCEJO/4-DOCUMENTO_TECNICO_DE_SOPORTE_CONCEJO/DT04_Anexo14_MapadeAmenaza_porIncendios_Forestales.pdf
- Alcaldía Mayor de Bogotá. (2016). *Informe de gestión 2016. Comisión distrital para la prevención y mitigación de incendios forestales. [Decreto 377 de 2014]*. Recuperado de : http://ambientebogota.gov.co/c/document_library/get_file?uuid=dfa275e4-a8eb-4514-97a8-91413591d7bd&groupId=586236
- Alcaldía Mayor de Bogotá. (31 de enero de 2017). *Por medio del cual se establecen medidas para la circulación de vehículos automotores y motocicletas, en la ciudad de Bogotá el primer jueves de cada mes de febrero de todos los años y se dictan otras disposiciones. [Decreto 054 del 2017]*

- Recuperado de:
<https://www.movilidadbogota.gov.co/web/sites/default/files/Decretos%20054%20de%202017.pdf>
- Alcaldía Mayor de Bogotá. (2018). *Análisis demográfico y proyecciones poblacionales de Bogotá. (informe técnico)* Recuperado de:
<https://www.movilidadbogota.gov.co/web/sites/default/files/Decretos%20054%20de%202017.pdf>
- Alcaldía Mayor de Bogotá. (24 de Julio de 2019). Bogotá se vistió de fiesta con el Festival de Verano 2019. Recuperado de: <https://bogota.gov.co/mi-ciudad/cultura-recreacion-y-deporte/asi-sera-el-festival-de-verano-2019-en-bogota>
- Alcaldía de Bogotá (2019). Lista la convocatoria para los concursos Bogotá Capital Mundial de la Bici. Recuperado de: <https://bogota.gov.co/mi-ciudad/movilidad/bogota-capital-mundial-de-la-bici-0>
- Allen, R., Adar, D., Avol, E., Cohen, M., Curl, L., Larson, T., y Kaufman, D. (2012). Modeling the residential infiltration of outdoor PM_{2.5} in the multi-ethnic study of atherosclerosis and air pollution (MESA air). *Environmental Health Perspectives*, 120 (6), 824-830. Recuperado de: <https://ehp.niehs.nih.gov/doi/pdf/10.1289/ehp.1104447>
- Arciniegas, C. (2012). Diagnóstico y control de material particulado: Partículas suspendidas totales y fracción respirable PM₁₀. *Luna Azul*, (34), 195-213. Recuperado de: <http://www.scielo.org.co/pdf/luaz/n34/n34a12.pdf>
- Babativa, C. (2018). *Exploración de perfiles verticales de humedad relativa, temperatura y concentraciones de PM_{2.5} y black carbon, en la localidad de Puente Aranda*. (Tesis de pregrado). Universidad de la Salle, Bogotá. Recuperado de: http://repository.lasalle.edu.co/bitstream/handle/10185/22430/41121210_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Baena, D., Jiménez, C., Zapata, C. y Ramírez, A. (2019). Red neuronal artificial aplicado para el pronóstico de eventos críticos de PM_{2.5} en el Valle de Aburra. *Universidad Nacional de Colombia-Dyna*, 86 (209), 347-356. Recuperado de: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/63228/71169>
- Baste, J. (2013). Determinación del comportamiento de los componentes contaminantes en el sistema de alimentación Diésel. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 22(4), 65-68. Recuperado de: <https://doaj.org/article/b523bf9ff8bb4866801d52014ab32238>
- Becerra, W. (2011). *Análisis de la ocurrencia de incendios forestales en Bogotá D.C., durante el fenómeno del niño 2009 – 2010. (informe técnico)*. Recuperado de: http://ambientebogota.gov.co/c/document_library/get_file?uuid=946af56c-385b-4cb6-aa64-f40f26862c5b&groupId=10157
- Berghmansa, P., Bleuxa, N., Panisa, I., Mishraa, b, R. Torfas, M y Van Poppel. (2009). Exposure assessment of a cyclist to PM₁₀ and ultrafine particles. *Science of The Total Environment*. 407 (4). Recuperado de: <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.unbosque.edu.co/science/article/pii/S004896970801067X>

- Blanco, C., Gafaro, A y Rojas, Y. (2015). Influence of precipitation scavenging on the PM_{2.5} / PM₁₀ ratio at the Kennedy locality of Bogotá, Colombia. *Revista Facultad De Ingeniería. Universidad De Antioquia*. 1 (76). 58-65. Recuperado de : <http://www.scielo.org.co/pdf/rfiua/n76/n76a07.pdf>
- Boldo, E. (2012). *Efecto de la exposición a PM_{2.5} sobre la mortalidad: Evaluación del impacto de las políticas públicas en la salud*. (Tesis Doctoral). Madrid: Universidad Autónoma de Madrid. Recuperado de: <https://pdfs.semanticscholar.org/92e4/23e0529a540c965da49e2843e746c3de4b24.pdf>
- Bustos, C. (2004). *Aplicación de modelos de dispersión atmosférica en la evaluación de impacto ambiental: Análisis del proceso*. (Tesis de Maestría). Santiago de Chile: Universidad de Chile. Recuperado de: <http://mgpa.forestaluchile.cl/Tesis/Bustos,%20Cristian.pdf>
- Cámara de comercio de Bogotá. (2007). *Perfil económico y empresarial de Puente Aranda*. Recuperado de: <https://bibliotecadigital.ccb.org.co/handle/11520/2884>
- Camilloni, I y Vera, C. (2015). La atmosfera. *Revista explora Ciencias Naturales*. 3(1), 2-16. Recuperado de: <http://www.bnm.me.gov.ar/giga1/documentos/EL002316.pdf>
- Carmona, L., Rincón, M., Castillo, A., Galvis, B., Sáenz, E., Manrique, A., y Pachón, E. (2016). Conciliación de inventarios top-down y bottom-up de emisiones de fuentes móviles en Bogotá, Colombia. *Revista Tecnura* 20(49), 59-74. Recuperado de: <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/Tecnura/article/view/10972/11840>
- Castillo, D. (2018). Gestión de la contaminación ambiental mediante técnicas de minería de datos Ambient pollution manage through data mining tolos. *Revista Cubana de Meteorología*, 24 (15).349-355. Recuperado de: <http://rcm.insmet.cu/index.php/rcm/article/view/440/598>
- Castro, P., Vera, J., Cifuentes, L., Wellenius, G., Verdejo, H., Sepúlveda, L y Llevaneras, S. (2010). Polución por material particulado fino (PM_{2.5}) incrementa las hospitalizaciones por insuficiencia cardiaca. *Revista Chilena De Cardiología*, 29(3), 306-314. Recuperado de: <https://scielo.conicyt.cl/pdf/rchcardiol/v29n3/art04.pdf>
- Ciudad Móvil. (2014). Plan de manejo Ambiental del patio Norte.(inf.tec): Bogotá
- Cogliati, M. (2010). *Calidad del aire en áreas de nuevos asentamientos habitacionales en Neuquén*. Boletín Geográfico, 15 (32). 11-20. Recuperado de: <http://revele.uncoma.edu.ar/htdoc/revele/index.php/geografia/article/view/87/85>
- Corporación Ambiental Empresarial. (2017). *Reporte de mediciones de carbono negro y PM_{2.5} en la ladrillera bellavista, ubicada en la región del Valle del Cauca. (informe técnico)*. Recuperado de: http://www.redladrilleras.net/assets/files/mediciones_Bellavista_2017.pdf
- Cortés, S. (2018). *Material particulado en el aire y su correlación con la función pulmonar en personas que realizan actividad física en la ciclo- ruta en la localidad kennedy en Bogotá: estudio descriptivo transversal*. (Tesis de Maestría). Universidad Nacional de Colombia. Recuperado de: <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:http://bdigital.unal.edu.co/70218/1/Tesis%2520Final%2520-%2520sergio%2520cortes%2520-%2520repositorio%2520UN.pdf>

- Dávila P. Jesús, Martines L. Enrique. (2016). Casos donde la definición de humedad relativa da lugar a interpretaciones incorrectas. (inf téc). Recuperado de: <http://www.cenam.mx/sm2016/pdf/1878.pdf>
- De Blas Martin, M. (2009). *Desarrollo y aplicación de técnicas avanzadas de medida de compuestos orgánicos volátiles en la atmósfera*. (Tesis Doctoral). Bilbao: Universidad del país Vasco. Recuperado de: <https://addi.ehu.es/bitstream/handle/10810/12212/Tesis-Maite-de-Blas.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas. (01 de junio de 2019). *Estadísticas vitales nacimientos y defunciones*. Recuperado de : <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/nacimientos-y-defunciones>
- Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas. (2018). *Censo Nacional de Población y vivienda, 2018*. Recuperado de: <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/censo-nacional-de-poblacion-y-vivenda-2018>
- Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas. (2018). *Encuesta de Transporte Urbano de Pasajeros. (informe técnico)*. Recuperado de: https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/transporte/bol_transp_Itrim18.pdf
- Departamento Nacional de Planeación. (2017). Los costos en la salud asociados a la degradación ambiental en Colombia ascienden a \$20,7 billones (inf.téc). Recuperado de: [https://www.dnp.gov.co/Paginas/Los-costos-en-la-salud-asociados-a-la-degradaci%C3%B3n-ambiental-en-Colombia-ascienden-a-\\$20,7-billones-.aspx](https://www.dnp.gov.co/Paginas/Los-costos-en-la-salud-asociados-a-la-degradaci%C3%B3n-ambiental-en-Colombia-ascienden-a-$20,7-billones-.aspx)
- Díaz, L. y Hurtado, G. (2015). *Efectividad de las políticas ambientales para controlar la contaminación del aire en Bogotá*. (Tesis de pregrado). Bogotá: Universidad de la Salle. Recuperado de: http://repository.lasalle.edu.co/bitstream/handle/10185/18151/10101018_2015.pdf?sequence=1
- Díaz, O., Rojas, N y Rojas, R y Rodríguez, A. (2018). Evaluación de la exposición de ciclistas a la contaminación del aire: una revisión de la literatura. *Revista Salud Pública*. 20(6), 764-770. Recuperado de: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/revsaludpublica/article/view/72744/72302>
- Dueñas, A., Morales, E y Olmos, L. (2009). Aglomeración industrial en el área metropolitana de Bogotá. *Revista Facultad de ciencias Económicas: Investigación y reflexión*. 17(2). 99-118. Recuperado de: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-68052009000200006
- El Espectador. (1 de abril de 2019). Calidad del aire en Bogotá: reportan baja en concentración de material particulado. Recuperado de: <https://www.elespectador.com/noticias/bogota/calidad-del-aire-en-bogota-reportan-baja-en-concentracion-de-material-particulado-articulo-847994>
- Environmental Protection Agency (EPA). (2018). User's Guide for the AERMOD Meteorological Preprocessor (AERMET). (informe técnico) Recuperado de: https://www3.epa.gov/ttn/scram/7thconf/aermod/aermet_userguide.pdf

- Figuroa, E., Lobo, A., Jorquera, P. y Labrin, F. (2013). Develando económicamente los impactos sobre la concentración atmosférica de material particulado de un proyecto de remodelación del transporte urbano: El caso del Transantiago en Chile. *Estudios Económicos*. 40 (1). 53-79. Recuperado de: <https://search-proquest-com.ezproxy.unbosque.edu.co/central/docview/1424320625/fulltextPDF/60B53C5509544A90P/Q/14?accountid=41311>
- Flores, J. (2018). Informe de gestión primer semestre de 2018 del proceso gestión direccionamiento estratégico. (informe técnico) Concejo de Bogotá. Recuperado de: http://concejodebogota.gov.co/cbogota/site/artic/20180628/asocfile/20180628150640/informe_de_gesti_n_2018_i_29062018.pdf
- Follos, F. (2012). *Lenguaje R aplicado al análisis de datos de calidad del aire, Manual básico para el tratamiento de datos de calidad del aire (24 ed.)*. Recuperado de: http://www.Openair-project.org/PDF/R_Openair_aplicado_a_calidad_del_aire.pdf
- Fontaneda, A. (2016). *Estudio de los dispositivos y sistemas que permiten el control y reducción de la contaminación en el sector del transporte por carretera*. (Tesis de Pregrado). España: Universidad Politécnica de Catalunya. Recuperado de: https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/99222/REPORT_172.pdf
- Franco, J. (2012). Contaminación atmosférica en centros urbanos. Desafío para lograr su sostenibilidad: caso de estudio Bogotá. *Revista EAN*, 8(72). 193-202. Recuperado de: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-81602012000100013
- Fussell, J., y Kelly, F. (2015). Air pollution and public health: emerging hazards and improved understanding of risk. *Environmental Geochemistry and Health*, 37(4), 631-649. Recuperado de: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10653-015-9720-1>
- Galindo, W. (2013). *Dinámica de la construcción por usos de la localidad de Tunjuelito en los años 2002 y 2012*. Recuperado de: <http://www.cieie.gov.co/index.php/es/send/13-catastro/1666-dinamica-de-la-construccion-por-usos-localidad-de-tunjuelito-anos-2002-y-2012>
- Gallego, A., Fernández, I., Sánchez, B., Henao, P., Martínez, R., Bravo, J., Pérez, J., Mayor, A. y Alegría, J. (2012). *Contaminación atmosférica*. Madrid, España: Editorial UNED.
- Gallego, F., Montero, P., y Salas, C. (2013). The effect of transport policies on car use: Evidence from Latin American cities. *Journal of Public Economics*, 107(11), 47-62. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0047272713001667>
- García, F. (2 de noviembre de 2018). Nuevos buses de Transmilenio: el diésel sigue mandando y el gas gana espacio. *El Espectador*. Recuperado de: <https://www.elespectador.com/noticias/bogota/nuevos-buses-de-transmilenio-el-diesel-sigue-mandando-y-el-gas-gana-espacio-articulo-821744>
- García, P. (2013). *Implementación del software estadístico Openair para el procesamiento y análisis de la información de la base de datos de la red de calidad de aire de Bogotá*. (Tesis de Maestría).

Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. Recuperado de :
<http://bdigital.unal.edu.co/39469/1/pedroalejandrogarciaavila.2013.pdf>

García, M., Ramírez, H., Ulloa, H., Arias y S., Pérez, A. (2012). Las inversiones térmicas y la contaminación atmosférica en la zona metropolitana de Guadalajara (México). *Investigaciones geográficas*. 8 (58). 9-29. Recuperado de:
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4290428>

García, M., Ramírez, H., Ulloa, H., Arias, S. y Pérez, A. (2012). *Las inversiones térmicas y la contaminación atmosférica en la zona metropolitana de Guadalajara (México)*. (Trabajo de grado). México: Universidad de Alicante. Recuperado de:
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4290428>

Gerharz, L., Krüger, A., y Klemm, O. (2009). Applying indoor and outdoor modeling techniques to estimate individual exposure to PM_{2.5} from personal GPS profiles and diaries: A pilot study. *Science of The Total Environment*, 407(18), 5184-5193. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com.ezproxy.unbosque.edu.co/science/article/pii/S0048969709005622>

Gramsch, E., Cáceres, D., Oyola, P., Reyes, F., Vásquez, Y., Rubio, M y Sánchez, G. (2014). Influence of surface and subsidence thermal inversion on PM_{2.5} and black carbon concentration. *Atmospheric Environment*. 98 (12), 290-298. Recuperado de:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1352231014006682?via%3Dihub>

Gatts, T., Liu, S., Liew, C., Ralston, B., Bell, C. y Li, H. (2012). An experimental investigation of incomplete combustion of gaseous fuels of a heavy-duty diesel engine supplemented with hydrogen and natural gas. *International Journal of Hydrogen Energy*. 37 (9). 7848-7859. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S036031991200184X>

Guevara, J. (2013). Cuantificación del perfil del viento hasta 100m de altura desde la superficie y su incidencia en la climatología eólica. *Revista Terranueva* etapa. 29 (46), 81-101. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/pdf/721/72130181006.pdf>

Harrison, R., Laxen, D., y Moorcroft, S. (2012). Processes affecting concentrations of fine particulate matter (PM_{2.5}) in the UK Atmosphere. *Atmospheric Environment*, 46(15), 1-10. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1352231011010879?via%3Dihub>

IDEAM. (2019). Probabilidad de incendios de la cobertura vegetal en las regiones caribe y Orinoquía. (inf. téc). Recuperado de:
<http://www.ideam.gov.co/documents/24277/83134001/COMUNICADO+ESPECIAL+INCENDIOS/b19c6ed0-3a1f-4c88-8cb9-d3c21957aeea>

IDEAM. (2016). Segundo Boletín de contaminación atmosférica. (inf. téc). Recuperado de: [http://www.sisaire.gov.co:8080/faces/docs/7-1-2018-0-22-33-819-1-1Segundo boletin contaminacion atmosferica.pdf](http://www.sisaire.gov.co:8080/faces/docs/7-1-2018-0-22-33-819-1-1Segundo%20boletin%20contaminacion%20atmosferica.pdf)

IDEAM. (s.f). Contaminación atmosférica. (inf. téc). Recuperado de: <http://www.ideam.gov.co/web/contaminacion-y-calidad-ambiental/calidad-del-aire>

IDEAM. (s.f). El Medio Ambiente en Colombia, La atmósfera, el tiempo y el clima. (inf.tec). Bogotá. Recuperado de: <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/000001/cap3-i.pdf>

IDEAM. (s.f). Anexo 10. Metodología para la evaluación de la capa límite planetaria y la elaboración del diagnóstico y pronóstico de la estabilidad atmosférica. (info.tec.) Bogotá: IDEAM.

IDEAM y Alcaldía Mayor de Bogotá. (s.f). *Estudio de la caracterización climática de Bogotá y cuenca alta del río Tunjuelo*. (Investigación). Bogotá. Recuperado de: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21135/CARACTERIZACION+CLIMATICA+BOGOTA.pdf/d7e42ed8-a6ef-4a62-b38f-f36f58db29aa>

Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambios Climáticos (IDIGER). (2017). *Plan de contingencia distrital. Incendios forestales*. Bogotá: Alcaldía Mayor de Bogotá.

Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambios Climáticos (IDIGER). (2019). *Caracterización general del escenario de riesgo por incendio forestal*. Recuperado de: <https://www.idiger.gov.co/rincendiof>

Invernizzi, G., Ruprecht, A., Mazza, R., De Marco, C., Močnik, G., Sioutas, C., y Westerdahl, D. (2011). Measurement of black carbon concentration as an indicator of air quality benefits of traffic restriction policies within the ecopass zone in milan, italy. *Atmospheric Environment*, 45(21), 3522-3527. Recuperado de: <https://www.sos-traffico-milano.it/Materiale/Articoliscientifici/InvernizziBlackCarbon.pdf>

Inche, J., Andia, Y., Huamanchurro, H., López, M., Vizcarra, J. y Florez, G. (2003). Paradigma cuantitativo: Un enfoque empírico y analítico. *Industria Data*. 6(1), 23-37. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/pdf/816/81606104.pdf>

Jiang, Y., Zhuang, G., Wang, Q., Huang, K., Deng, C., Yu, G. y Zhou, Z. (2018). Impact of mixed anthropogenic and natural emissions on air quality and eco-environment—the major water-soluble components in aerosols from northwest to offshore isle. *Air Quality, Atmosphere y Health*, 11(5), 521-534. Recuperado de : http://acs.engr.utk.edu/publications/2018_Jiang_AQAH.pdf

Jiménez, F. (2016). *Altura de la capa de mezcla en un área urbana, montañosa y tropical caso de estudio: Valle de Aburrá (Colombia)*. (Tesis Doctoral). Universidad de Antioquia. Recuperado de: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co/handle/10495/5738>

Leiva, G., Santibañez, L., Ibarra, E., Matus, C y Seguel, R. (2013). A five-year study of particulate matter (PM_{2.5}) and cerebrovascular diseases. *Environmental Pollution*, 181(12), 1-6. Recuperado de <https://www.sciencedirect-com.ezproxy.unbosque.edu.co/science/article/pii/S0269749113003175>

Lowell, D., y Kamakate, F. (2012). Urban off-cycle NOx emissions from euro IV/V trucks and buses. *International Council on Clean Transportation*, 75(18), 1-48. Recuperado de: http://admin.indiaenvironmentportal.org.in/files/file/ICCT_WP18_urban_Nox_emissions.pdf

- Mamta, P., Bassin, J. (2011). Analysis of ambient air quality using air quality index. *International Journal for Innovative Research in Science & Technology* 1 (10). 1-9. Recuperado de: <https://www.technicaljournalsonline.com/ijeat/VOL%20I/IJAET%20VOL%20I%20ISSUE%20I%20JULY%20SEPTEMBER%202010/Article%2011.pdf>
- Ministerio Para la Transformación Ecológica de España. (s.f). Partículas en suspensión. Recuperado de: <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/emisiones/prob-amb/particulas.aspx>
- Ministerio de Medio Ambiente. (2016). Documento técnico de soporte para mejorar la Calidad del aire. Recuperado de: <http://www.andi.com.co/Uploads/Documento%20tecnico%20de%20soporte%20Agosto%20V5%20Final.pdf>
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo territorial. (2010). Política de Prevención y Control de la Contaminación del Aire. (inf.tec). Recuperado de: <http://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/Polit%C3%ACcas de la Direcci%C3%B3n/Pol%C3%ADtica de Prevenci%C3%B3n y Control de la Contaminaci%C3%B3n del Aire.pdf>
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2007). Protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire. (inf téc). Recuperado de: https://cortolima.gov.co/sites/default/files/images/stories/calidadAire/protocolo_monitoreo_calidad_aire.pdf
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). Política de Prevención y Control de la Contaminación del Aire. inf.tec. Recuperado de: <http://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/Polit%C3%ACcas de la Direcci%C3%B3n/Pol%C3%ADtica de Prevenci%C3%B3n y Control de la Contaminaci%C3%B3n del Aire.pdf>
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (24 de Marzo del 2010). Resolución 610 del 2010. Recuperado de:
- Nazelle, A., Fruin, S., Westerdahl, D., Martinez, D., Ripoll, A., Kubesch, N y Nieuwenhuijsen, M. (2012). A travel mode comparison of commuters' exposures to air pollutants in Barcelona. *Atmospheric Environment* 59(20). 151-159. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com.ezproxy.unbosque.edu.co/science/article/pii/S1352231012004621>
- Ochoa, M. (2011). *Variabilidad de la Cuenca Colombia (mar Caribe) asociada con El Niño-Oscilación del Sur, vientos Alisios y procesos locales*. (Tesis de posgrado). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. Recuperado de: <https://core.ac.uk/download/pdf/11054713.pdf>
- OMS. (2006). Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre. (inf tec). Recuperado de: https://www.who.int/publications/list/who_sde_phe_oeh_06_02/es/

- Ortiz, E. y Rojas, N (2013). Estimación de los beneficios económicos en salud asociados a la reducción de PM₁₀. *Revista de Salud Pública*, 15(1), 90-102. Bogotá. Recuperado de: <https://www.scielo.org/pdf/rsap/2013.v15n1/90-102/es>
- Ortiz, E. (2016). *Medición y caracterización de la turbulencia atmosférica en Bogotá y su influencia en la dispersión de contaminantes*. (Tesis de Maestría). Universidad Nacional de Colombia, Colombia. Recuperado de: <http://bdigital.unal.edu.co/55987/7/EdisonYesidOrtizDur%C3%A1n.2016.pdf>
- Organización de las Naciones Unidas, (ONU). (2013). (28 de Junio de 2013). Emissions of air pollutants in transport: an overview. (inf.téc). Recuperado de: <http://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2013/wp29/WP.29-160-19-Rev.1.pdf>
- Parra, H. (17 de 02 de 2019). Las causas que llevaron a Bogotá a la emergencia por contaminación. *El Tiempo*. Recuperado de: <https://www.eltiempo.com/bogota/las-causas-que-llevaron-a-bogota-a-la-emergencia-por-contaminacion-327796>
- Palacio Soto, F., Zafra A., y Rodríguez P. (2014). Evaluación de la calidad del aire mediante un laboratorio móvil: Puente Aranda (Bogotá D.C., colombia). *Revista Facultad De Ingeniería Universidad De Antioquia*, 1 (71), 153-166. Recuperado de: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-62302014000200014
- Perilla, L y Rivera S. (2014). *Caracterización de suelos arcillosos desecados al occidente de la sabana de Bogotá*. (Tesis de pregrado). Universidad Santo Tomás. Recuperado de: <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/707/Caracterizacion%20de%20suelos%20arcillosos%20desecados%20al%20occidente%20de%20la%20Sabana%20de%20Bogota.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Pattinson, W., Kingham, S., Longley, I. y Salmond, J. (2017). Potential pollution exposure reductions from small-distance bicycle lane separations. *Transport and health*. 4 (20), 40-52. Recuperado de: <https://www.sciencedirect-com.ezproxy.unbosque.edu.co/science/article/pii/S2214140516303504#s0050>
- Pichiule, M., Guaita, R., Maté, T., Linares, C y Julio, D. (2011). Short-term impact of particulate matter (PM_{2.5}) on respiratory mortality in Madrid. *International Journal of Environmental Health Research*. 21(4), 1-13. Recuperado de <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/09603123.2010.544033?needAccess=true>
- Quijano, A., Quijano, M y Henao, J. (2010). Caracterización fisicoquímica del material particulado fracción respirable PM_{2.5} en Pamplona-Norte de Santander-Colombia. *Revista Bistua*. 8(1). 53-66. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/49613524_Caracterizacion_fisicoquimica_del_material_particuladofraccion_respirable_PM25_en_Pamplona-Norte_de_Santander-Colombia
- Red de Monitoreo de la Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB). (2019). Informes Día Sin Carro. Recuperado de: <http://201.245.192.252:81/>

- Rodríguez, R., Benito, A., y Portela, A. (2010). *Meteorología y climatología*. España: Editorial Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología. Recuperado de: <https://cab.inta-csic.es/uploads/culturacientifica/adjuntos/20130121115236.pdf>
- Rodríguez, A., Rojas, Y., Blanco, C., Herrera, M., y Fernández, A. (2018). Short-term effects of air pollution on respiratory and circulatory morbidity in Colombia 2011-2014: A multi-city, time-series analysis. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(8), 1-12. Recuperado de: <https://www.mdpi.com/1660-4601/15/8/1610>
- Rodríguez, A., y Pérez, A. (2017). Métodos científicos de indagación y de construcción del conocimiento. *Revista Escuela de Administración de Negocios*, 1 (82), 1-26. Recuperado de: <http://www.scielo.org.co/pdf/ean/n82/0120-8160-ean-82-00179.pdf>
- Rincón, A. (2015). *Simulación regional de contaminantes atmosféricos para la Ciudad de Bogotá*. (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia. Recuperado de: <http://bdigital.unal.edu.co/51092/1/74189961.2015.pdf>
- Rivera, O., y Ramos, S. (2015). Una alternativa para el tratamiento y análisis de datos de calidad del aire: El paquete Openair. *Kuxulkab* 21 (41), 11-15. Recuperado de: <http://www.revistas.ujat.mx/index.php/kuxulkab/article/view/1426/1231>
- Rodríguez, O. (2017). *Diagnóstico de vehículos que serán enajenados y se encuentran en los patios de la ciudad de Bogotá*. (Tesis de especialización). Bogotá: Universidad Católica de Colombia. Recuperado de: <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/15454/1/FINAL%20OSCAR%20VERSION%204.2.pdf>
- Romero, M., Francisca, O., y Álvarez, M. (2006). La contaminación del aire: Su repercusión como problema de salud. *Revista Cubana De Higiene Y Epidemiología*, 44(2), 1-14. Recuperado de: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1561-30032006000200008
- Ropkings, K., y Carslaw, D. (2012). Openair — An R package for air quality data analysis. *Environmental Modelling y Software*, 27(14), 52-61. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364815211002064?via%3Dihub>
- Registro Único Nacional De Tránsito. (2019). Boletín de prensa 001 de 2019. inf.téc. Recuperado de: <https://www.runt.com.co/sites/default/files/Bolet%C3%ADn%20de%20Prensa%2001%20de%202019.pdf>
- Sánchez, Á. (2010). Nuevo reglamento Euro5 y Euro6. *Cesvimap: Publicación técnica del Centro de Experimentación y Seguridad Vial Mapfre*, 114 (72), 48-51. Recuperado de: <http://dialnet.unirioja.es/servlet/oaiart?codigo=3240189>
- Sánchez, A., y Gandara. (1 Ed). (2011). *Conceptos básicos de gestión ambiental y desarrollo sustentable*. D.C .México : S y G editores. Recuperado de: <https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2011/06/conceptosbasicosgestionambientaldesarrollosustentable.pdf>

- Santa Cruz, A. (2000). *Difusión de contaminantes gaseosos en la atmósfera*. (Cátedra: Área Informática Aplicada a la Ingeniería de Procesos). Universidad Tecnológica Nacional de Argentina. Recuperado de: https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/quimica/5_anio/orientadora2/apuntes_catedra/Estabilidad%20Atmosfrica.pdf
- Secretaría Distrital de Ambiente (13 de marzo de 2019). Red de Monitoreo de la Calidad del Aire en Bogotá. Recuperado de: <http://ambientebogota.gov.co/red-de-calidad-del-aire>
- Secretaría Distrital de Ambiente (2013) Características generales de las estaciones de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá y parámetros medidos en cada una de ellas a 2013. Recuperado de: <http://ambientebogota.gov.co/web/sda/estaciones-rmcab>
- Secretaría Distrital de Ambiente (2013). Distribución de las estaciones de la RMCAB al año 2013. Recuperado de: <http://ambientebogota.gov.co/web/sda/red-de-calidad-del-aire>
- Secretaría Distrital de Ambiente (s.f). Red de Monitoreo de la Calidad del Aire en Bogotá-Informes día sin carro Recuperado de: <http://201.245.192.252:81/>
- Secretaría Distrital de Movilidad (SIMUR). (s.f). Aforos vehiculares y peatonales. Recuperado de: <http://www.simur.gov.co/portal-simur/datos-del-sector/aforos-vehiculares-y-peatonales/>
- Secretaría Distrital de Movilidad. (2015). Movilidad en cifras. inf.téc. Recuperado de: https://www.movilidadbogota.gov.co/web/SIMUR/ARCHIVOS/Movilidad_Cifras_2015_V4_marzo2017.pdf
- Secretaría Distrital de Planeación. (2012). Unidad de Planeamiento Zonal No. 45 Carvajal. (inf téc). Recuperado de: <http://www.sdp.gov.co/gestion-territorial/norma-urbana/normas-urbanisticas-vigentes/upz/unidad-de-planeamiento-zonal-no-45-carvajal>
- Secretaría de Movilidad. (s.f). Quienes usan bici en Bogotá la prefieren porque ahorran tiempo. Recuperado de: <https://bogota.gov.co/mi-ciudad/movilidad/quienes-usan-bici-en-bogota-la-prefieren-porque-ahorran-tiempo>
- Secretaría Distrital de Movilidad.(Jueves 7 de Febrero de 2019).Bogotá se consolida como la capital mundial de la bici.Recuperado de: <https://www.movilidadbogota.gov.co/web/node/1879>
- Soto, J. (2018). *Efectos a corto plazo de la contaminación del aire sobre la mortalidad cardiopulmonar en la localidad de Engativá, Bogotá*. (Tesis de pregrado). Universidad Santo Tomás, Bogotá. Recuperado de : <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/10657?show=full>
- Sociedad Geográfica de Colombia (Sogeocol). (s.f). *Informe Plan de ordenamiento territorial-Cuenca alta del río Bogotá*. Recuperado de: <https://sogeocol.edu.co/documentos/cuencap7.pdf>
- Semana Sostenible. (febrero 16 de 2019). Así va la calidad del aire en Bogotá. Recuperado de: <https://sostenibilidad.semana.com/actualidad/articulo/asi-va-la-calidad-del-aire-en-bogota/43012>

- Tobón, C. (2016). *Altura de la Capa de Mezcla en un área urbana, montañosa y tropical. Caso de estudio: Valle de Aburrá* (Colombia). (Tesis Doctoral). Universidad de Antioquia, Colombia. Recuperado de: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co/handle/10495/5738>
- Torres, C y Galindo, O. (2016). *Comportamiento del material particulado y su incidencia en los usuarios de la ciclo-vía recreativa de la carrera séptima en Bogotá D.C.* (Tesis de pregrado). Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Recuperado de: <http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/6238/5/TorresGarc%c3%adaCarlosAlberto2017.pdf>
- Universidad Libre. (2019). *Calidad de aire durante el día sin carro y sin moto*. Informe Universidad libre. Bogotá. Recuperado de: <http://www.unilibre.edu.co/bogota/ul/noticias/noticias-universitarias/4020-calidad-de-aire-durante-el-dia-sin-carro-y-sin-moto>
- Universidad El Bosque. (s.f.). Perfil del estudiante de ingeniería Ambiental. Recuperado de: <https://www.unbosque.edu.co/ingenieria/carrera/ingenieria-ambiental>
- Universidad de los Andes. (s.f.). Descripción de Bogotá. Movilidad Uniandes. Recuperado de : <https://campusinfo.uniandes.edu.co/es/comollegar/bogota>
- Ugalde, N., y Balbastre, F. (2013). Investigación cuantitativa e Investigación cualitativa: Buscando las ventajas de las diferentes metodologías de Investigación. *Revista de Ciencias Económicas de la Universidad de Costa Rica* 31 (2), 179-187. Recuperado de: <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/economicas/article/view/12730/11978>
- Vanderstraeten, P., Forton, M., Brasseur, O., Lénelle, Y., Meurrens, A., y Offer, Z. (2011). Observation of unusual high particulate mass and number concentration during traffic ban hours of the 2009 car free sunday in the brussels urban area. *Forum Geografic*, X(1), 167-176. Recuperado de : <http://forumgeografic.ro/wp-content/uploads/2011/1/Vanderstraeten.pdf>
- Vargas, F. A., y Rojas, N. Y. (2010). Composición química y reconstrucción másica del material particulado suspendido en el aire de Bogotá. *Ingeniería E Investigación*, 30(2), 105-115. Recuperado de: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-56092010000200011&lng=en&tylng=en
- Venkateswara, B., y Prasad, R. (2010). A Review on Diesel Soot Emission, its Effect and Control. *Chemical Reaction Engineering y Catalysis*, 5(2), 69-86. Recuperado de https://www.researchgate.net/profile/Ram-Prasad11/publication/49608531_A_Review_on_Diesel_Soot_Emission_its_Effect_and_Control/links/5623bb1308aed8dd1948bf8a.pdf
- Villegas, N., y Parra, M. (2017). *Análisis preliminar de la caracterización y contribución de fuentes de material particulado PM10 en el aire-ambiente de Bogotá*. (Tesis de pregrado). Universidad de La Salle, Bogotá. Recuperado de: http://repository.lasalle.edu.co/bitstream/handle/10185/22426/41121054_2017.pdf?sequence=1
- Viard, B., y Fu, S. (2015). The effect of Beijing's driving restrictions on pollution and economic activity. *Journal of Public Economics*, 125(17), 98-115. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S004727271500016X>

- Vicuña, R. (2017). *Evaluación de la altura de la capa de mezcla atmosférica como un parámetro para calcular la dispersión de los contaminantes en la provincia de Coronel Portillo – Ucayali*. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Ucayali. Recuperado de: <http://repositorio.unu.edu.pe/handle/UNU/3194>
- Wang , S., y Hao, J. (2012). Air quality management in China: Issues, challenges, and options. *Environmental Sciences*, 24(1), 2-13. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1001074211607249>
- Wuebbles, G., y Rodhe, H. (2002). Atmospheric methane and global change. *Earth-Science Reviews*, 57(3), 177-210. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0012825201000629>
- Xiaojun, C., Xianpeng , L., y Peng, X. (2015). IOT-based air pollution monitoring and forecasting system. *IEEE* 11 (5). 20-27. Recuperado de: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7361361>
- Xianling, L., Xi, J., y Yixin, Y. (2018). What causes PM_{2.5} pollution Cross-economy empirical analysis from socioeconomic perspective. *Energy Policy* 119(10), 458-472 .Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421518302568>
- Xia, T., Nitschkeb, M., Zhang, Y., Shah, P., Crabb, S y Hansena, A.(2015). Traffic-related air pollution and health co-benefits of alternative transport in Adelaide, South Australia. *Environment International*. 74 (6). 281-290. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160412014002980>
- Yin, Q., Wang, J., Hu, M., y Wong, H. (2016). Estimation of daily PM_{2.5} concentration and its relationship with meteorological conditions in Beijing. *Journal of Environmental Sciences*. 48 (16). 161-168. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1001074216301371>
- Yuhong, Z. (2011). Responding to the global challenge of climate change – hong kong and “One country two systems”. *Carbon y Climate Law Review*, 5(1), 70-81. Recuperado de : https://www.jstor.org/stable/24324012?seq=1#page_scan_tab_contents
- Zannetti, P. (1990). *Air pollution modeling- Theories, computational methods and availabe software*. California: Aero Vironment Inc. Recuperado de https://books.google.es/books?hl=esylr=yid=q6vwBwAAQBAJyoi=fndypg=PA1ydq=Software+AND+air+qualityyots=0UJhrzFOnnysig=pcVwELyff2aJomx8jUa_Mr-XWbw#v=onepageyq=Software%20AND%20air%20qualityyf=false

Glosario de términos

Atmósfera: La atmósfera es una capa gaseosa de aproximadamente 10.000 km de espesor que rodea la litosfera e hidrosfera. Está compuesta de gases y de partículas sólidas y líquidas en suspensión atraídas por la gravedad terrestre. En ella se producen todos los fenómenos climáticos y meteorológicos que afectan al planeta, regula la entrada y salidos de energía de la tierra y es el principal medio de transferencia del calor (Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2006).

CO (Monóxido de carbono): gas inflamable, incoloro e insípido que se produce por la combustión de combustibles fósiles (Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2006).

Contaminación atmosférica: Presencia de sustancias en la atmósfera en altas concentraciones en un tiempo determinado como resultado de actividades humanas o procesos naturales, que pueden ocasionar daños a la salud de las personas o al ambiente (Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2006).

NO₂ (Dióxido de nitrógeno): gas de color pardo rojizo fuertemente tóxico cuya presencia en el aire de los centros urbanos se debe a la oxidación del nitrógeno atmosférico que se utiliza en los procesos de combustión en los vehículos y fábricas (Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2006).

O₃ (Ozono): Gas azul pálido que, en las capas bajas de la atmósfera, se origina como consecuencia de las reacciones entre los óxidos de nitrógeno y los hidrocarburos (gases compuestos de carbono e hidrógeno principalmente) en presencia de la luz solar (Ministerio de medio ambiente y Desarrollo sostenible, 2010).

PM₁₀ (Material Particulado Menor a 10 Micras): Material particulado con un diámetro aerodinámico menor o igual a 10 micrómetros nominales (Ministerio de medio ambiente y Desarrollo sostenible, 2010).

PM_{2.5} (Material Particulado Menor a 2,5 Micras): Material particulado con un diámetro aerodinámico menor o igual a 2,5 micrómetros nominales (Ministerio de medio ambiente y Desarrollo sostenible, 2010).

Salud ambiental: Es un componente esencial de la salud pública que promueve la calidad de vida, donde el ser humano debe ser tomado en cuenta como un integrante más de los ecosistemas.

SO₂ (Dióxido de Azufre): Gas incoloro, no inflamable que posee un fuerte olor en altas (Ministerio de medio ambiente y Desarrollo sostenible, 2010).